



Nycolas Glerean

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Análise estrutural de vias-férreas com incorporação de materiais não tradicionais nas camadas granulares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Professor Doutor José Nuno Varandas
Ferreira, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientador: Doutor André Luís Marques Paixão, In-
vestigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia
Civil

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Arguente: Doutora Sara Rios da Rocha e Silva

Vogal: Prof. Doutor José Nuno Varandas Ferreira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Análise estrutural de vias-férreas com incorporação de materiais não tradicionais nas camadas granulares

Copyright © Nycolas Glerean, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedicatória à minha prima Juliana Sodré, que sempre estará presente no meu coração.

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer a minha família e amigos, em especial ao meu irmão, minha mãe, meu pai e ao Divaldo Valente Soroa por todo apoio ao longo de toda a minha trajetória académica neste instituto de tanto prestígio, que é a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa (FCT).

Ao meu orientador Professor Doutor José Nuno Varandas Ferreira por todo o tempo que disponibilizou para me fornecer, o apoio e conhecimento necessários para a realização do presente documento. Pessoa a quem tenho grande admiração por toda sabedoria e inspiração, com grande facilidade de transmiti-las aos seus alunos.

Ao meu coorientador Doutor André Luís Marques Paixão, com quem tive muito gosto de trabalhar, com uma grande competência de liderança e paciência para tirar qualquer dúvida. Principalmente pela minha inclusão, me tornando parte do meio onde trabalhei para execução da presente dissertação, a quem quero manifestar um enorme agradecimento.

Ao Doutor Eduardo Manuel Cabrita Fortunato por proporcionar esta inesquecível oportunidade, quem levarei como um grande exemplo de líder.

Ao Técnico Superior Rui Ribeiro Coelho por todo o auxílio que me transmitiu e pelos bons momentos, com conversas sempre interessantes.

A todos os trabalhadores do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), por me proporcionarem um ambiente de trabalho excelente.

A todos os professores da FCT, que fizeram parte do meu percurso académico, por todos os ensinamentos, dos quais me forneceram as ferramentas necessárias para desempenhar cada etapa do curso de Mestrado Integrado de Engenharia Civil.

Resumo

Com vista a otimizar e tornar ainda mais sustentável o transporte ferroviário, há cada vez maior interesse em incorporar materiais não tradicionais na sua infraestrutura, em alternativa aos materiais naturais, resultando em benefícios tanto económicos como ambientais.

Neste contexto e no seguimento de estudos anteriores, surgiu a oportunidade de contribuir para o estudo do Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) com o acréscimo de partículas de borracha, como materiais alternativos para a camada de balastro ferroviário.

Neste trabalho, são simuladas situações de passagem de comboio nas vias-férreas balastradas, através da modelação numérica pelo Método de Elementos Finitos, utilizando um programa de cálculo disponível para o efeito, o programa *Pegasus*. A calibração do programa, decorreu a partir de um modelo de referência, com a sua calibração efetuada por parâmetros mecânicos e geométricos, aproximando os seus resultados aos obtidos anteriormente por medições em campo.

O estudo paramétrico, efetuado com o programa *Pegasus*, persegue a comparação entre os materiais alternativos referidos acima e o balastro convencional (granítico). O objetivo desta análise é avaliar o desempenho destes materiais, em relação aos seus estados de tensão, gerados pelos efeitos dinâmicos originados da passagem dos veículos nas estruturas ferroviárias.

Palavras-chave: vias-férreas balastradas, análise estrutural, Modelação numérica pelo Método dos Elementos Finitos, Agregado siderúrgico inerte para construção - ASIC, partículas de borracha, balastro, estado de tensão.

Abstract

In order to optimize and make the railway transportation even more sustainable, there is an increasing interest in incorporating non-traditional materials as an alternative to natural materials in railways infrastructure. This possibility results in economic and environmental benefits.

In this context and following previous studies, an opportunity arose to contribute with the study of the Inert Steel Slag Aggregate for Construction (ISAC) with the addition of rubber chips from scrap tyres, as alternative materials for the ballast layer.

In this paper, train crossing situations in ballasted railways are simulated using numerical modeling with the Finite Element Method, using a calculation program available for this purpose, the *Pegasus* program. The calibration of the program was based on a reference model, with its calibration performed by means of mechanical and geometric parameters to approximate its results to the measurements obtained in previous field tests.

The parametric study with the *Pegasus* program aims to compare the alternative materials mentioned above with the traditional ballast (granite). The purpose of this analysis is the evaluation of the performance of these materials, comparing their stress states, generated by the dynamic effects caused by the trains in the railway structures.

Keywords: ballasted railways, structural analysis, numerical modeling with the Finite Element Method, Inert Steel Slag Aggregate for Construction – ISAC, rubber chips, ballast, stress state

Índice de Matérias

Copyright	i
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice de Matérias	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas	xix
Lista de abreviaturas e símbolos	xxi
1 Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivo	3
1.4. Estrutura do documento.....	3
2. Descrição das vias-férreas balastradas	5
2.1. Contextualização	5
2.2. Elementos das vias-férreas balastradas.....	6
2.2.1. Carris.....	7
2.2.2. Elementos de ligação.....	8
2.2.3. Travessas.....	8
2.2.4. Balastro	9
2.2.5. Sub-balastro	9
2.2.6. Coroamento.....	10
2.2.7. Fundação	10
3. Materiais alternativos para camadas de vias-férreas	11
3.1. Contextualização	11
3.2. Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)	12

3.2.1.	Aspetos gerais.....	12
3.2.2.	Estudos laboratoriais sobre ASIC	14
3.3.	Partículas de borracha	16
3.3.1.	Aspetos gerais.....	16
3.3.2.	Estudos laboratoriais sobre partículas de borracha.....	16
4.	Modelação numérica tridimensional do sistema veículo-via-substrutura	21
4.1.	Breve enquadramento histórico	21
4.2.	Elementos constituintes do programa utilizado	22
4.2.1.	Composição do sistema ferroviário	23
4.2.2.	Interação entre subsistemas	25
4.3.	Equações que regem o modelo numérico	28
4.3.1.	Método de integração das equações diferenciais.....	29
4.3.2.	Opções de elasticidade da subestrutura	29
4.3.3.	Amortecimento de Rayleigh	32
4.3.4.	Condições de fronteira	33
5.	Estudos preliminares e calibração do modelo numérico.....	35
5.1.	Enquadramento.....	35
5.2.	Modelação do <i>Pegasus</i>	36
5.2.1.	Definição da geometria	37
5.2.2.	Modelo do veículo	39
5.3.	Estudos preliminares.....	40
5.3.1.	Carga do veículo	41
5.3.2.	Parâmetros mecânicos da subestrutura.....	41
5.3.3.	Impacto dos parâmetros não-lineares do comportamento dos materiais	46
5.3.4.	Comparação entre modelos lineares e não-lineares	50
5.4.	Comparação dos resultados da modelação numérica com os registos de campo ...	57
5.4.1.	Parâmetros do modelo de calibração adotado	57
5.4.2.	Análise dos ensaios do dia 06/06/12.....	58
5.4.3.	calibração das velocidades do modelo numérico	59
5.4.4.	Calibração dos deslocamentos do modelo numérico	64
5.4.5.	Conclusões da calibração	66
6.	Análise estrutural de vias-férreas com materiais alternativos na camada de balastro	67
6.1.	Considerações iniciais	67
6.2.	Adaptação dos parâmetros ensaiados aos da modelação numérica	68
6.3.	Estudo paramétrico do ASIC.....	69
6.3.1.	Comparação entre agregado granítico e ASIC dos parâmetros não-lineares ..	69
6.3.2.	Comparação entre agregado granítico e ASIC em deslocamentos.....	72

6.3.3.	Comparação entre os estados de tensão no agregado granítico e no ASIC ...	73
6.4.	Estudo paramétrico do acréscimo de borracha	78
6.4.1.	Avaliação da adição de borracha nos parâmetros não-lineares.....	78
6.4.2.	Avaliação da adição de borracha nos deslocamentos	81
6.4.3.	Avaliação da influência da adição de borracha nos estados de tensão dos materiais da camada de balastro	82
7.	Conclusões e estudos futuros	89
7.1.	Conclusões	89
7.2.	Estudos futuros	90
	Referências bibliográficas	91

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 ESQUEMA ESTRUTURAL DO PERFIL LONGITUDINAL DA VIA BALASTRADA, RETIRADO DE (FORTUNATO 2005)	6
FIGURA 2.2 ESQUEMA ESTRUTURAL DO PERFIL TRANSVERSAL DA VIA BALASTRADA, RETIRADO DE (FORTUNATO 2005)	7
FIGURA 3.1 FOTOGRAFIAS DAS AMOSTRAS DE ASIC UTILIZADAS EM ESTÁGIO NO LNEC	13
FIGURA 3.2 GRÁFICO DOS MÓDULOS RESILIENTES POR SOMATÓRIO DAS TENSÕES PRINCIPAIS, RETIRADAS DOS TRABALHOS DE (DELGADO 2019)	15
FIGURA 3.3 A IMAGEM DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS, B DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO EQUIPAMENTO (DELGADO 2019).....	15
FIGURA 3.4 COMPONENTES DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NOS TESTES LABORATORIAIS, A BORRACHA 20. B BORRACHA 2. C BORRACHA 1. A SUB-BALASTRO CONVENCIONAL (SIGNES ET AL. 2015)	17
FIGURA 3.5 CURVAS DOS MÓDULOS RESILIENTES PARA CADA MISTURA DE BORRACHA, ADAPTADO DE (SIGNES ET AL. 2015)	18
FIGURA 3.6 CURVAS APROXIMADAS DE MÓDULOS RESILIENTES ÀS DO TRABALHO (SIGNES ET AL. 2015)	19
FIGURA 4.1 ESQUEMA DE ELEMENTO HEXAÉDRICO	23
FIGURA 4.2 REPRESENTAÇÃO DE ELEMENTOS DE VIGA RÍGIDOS	24
FIGURA 4.3 REPRESENTAÇÃO DO BOGIE DO VEÍCULO DO MODELO, ADAPTADO DE (J. N. VARANDAS, PAIXÃO, AND FORTUNATO 2017)	25
FIGURA 4.4 FORÇAS DE INTERAÇÃO ENTRE TRAVESSA E SUPERFÍCIE DA CAMADA DE BALASTRO, ADAPTADO DE (J. N. VARANDAS 2013).....	26
FIGURA 4.5 ESQUEMA DAS ETAPAS DE CÁLCULO DO PROGRAMA <i>PEGASUS</i> , ADAPTADO DE (J. N. VARANDAS 2013)	26
FIGURA 4.6 ESQUEMA EXEMPLIFICATIVO DAS SECÇÕES DO PROGRAMA <i>PEGASUS</i> , ADAPTADO DE (J. N. VARANDAS 2013)	27
FIGURA 4.7 DESLOCAMENTO OBTIDOS NO BALASTRO AO LONGO DAS ETAPAS DE CÁLCULOS NO TEMPO	28
FIGURA 4.8 RELAÇÃO $Er - \theta$, ADAPTADO DE (J. N. VARANDAS 2013)	31

FIGURA 4.9 ESQUEMA DO INCREMENTO DE ESPESSURA DE CAMADA POR MOLAS E AMORTECEDORES, ADAPTADO DE (J. N. VARANDAS 2013).....	33
FIGURA 5.1 PERSPETIVA DA GEOMETRIA DO MODELO ADOTADA PARA A CALIBRAÇÃO.....	37
FIGURA 5.2 VISTA TRANSVERSAL DA GEOMETRIA DO MODELO ADOTADA PARA A CALIBRAÇÃO.....	38
FIGURA 5.3 VISTA LONGITUDINAL DA GEOMETRIA DO MODELO ADOTADA PARA A CALIBRAÇÃO	38
FIGURA 5.4 DISTÂNCIAS LONGITUDINAIS DA CARRUAGEM MOTORA DO VEÍCULO MODELADO, ADAPTADO DE (TRAINLOGISTIC 2020)	39
FIGURA 5.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS CARGAS MÁXIMAS E MÍNIMAS NOS DESLOCAMENTOS, AO LONGO DO TEMPO.....	41
FIGURA 5.6 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA CAMADA DE BALASTRO NOS DESLOCAMENTOS, AO LONGO DO TEMPO	42
FIGURA 5.7 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA CAMADA DE SUB-BALASTRO NOS DESLOCAMENTOS, AO LONGO DO TEMPO	43
FIGURA 5.8 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA CAMADA DE COROAMENTO NOS DESLOCAMENTOS, AO LONGO DO TEMPO	43
FIGURA 5.9 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA CAMADA DE FUNDAÇÃO NOS DESLOCAMENTOS, AO LONGO DO TEMPO	44
FIGURA 5.10 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA RIGIDEZ DAS PALMILHAS DE CARRIL NOS DESLOCAMENTOS, AO LONGO DO TEMPO	45
FIGURA 5.11 AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA FUNDAÇÃO SUBSTITUÍDA, NOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DO TEMPO	46
FIGURA 5.12 IMPACTO DA VARIAÇÃO DO PARÂMETRO K2 NAS CURVAS DE MÓDULO RESILIENTE POR TENSÕES PRINCIPAIS	47
FIGURA 5.13 IMPACTO DA VARIAÇÃO DO PARÂMETRO K2 NOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DO TEMPO	48
FIGURA 5.14 IMPACTO DA VARIAÇÃO DO PARÂMETRO K1 NAS CURVAS DE MÓDULO RESILIENTE POR TENSÕES PRINCIPAIS	49
FIGURA 5.15 IMPACTO DA VARIAÇÃO DO PARÂMETRO K1 NOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DO TEMPO	49
FIGURA 5.16 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS ELÁSTICOS LINEARES E NÃO LINEARES DO GRANITO EM DESLOCAMENTOS NO TEMPO.....	50
FIGURA 5.17 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS LINEARES E NÃO LINEARES EM TENSÕES σ_z NO PLANO xy	51
FIGURA 5.18 LOCALIZAÇÃO DOS ELEMENTOS UTILIZADOS PARA OS ESTUDOS DE TENSÕES DOS MATERIAIS ALTERNATIVOS, ADAPTADO DE (PAIXÃO ET AL. 2016).....	52
FIGURA 5.19 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS LINEARES E NÃO LINEARES DE TENSÕES NORMAIS E DE CORTE, AO LONGO DO TEMPO	53
FIGURA 5.20 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS LINEARES E NÃO LINEARES DE TENSÕES MÉDIAS E DEVIATÓRICAS AO LONGO DO TEMPO	55

FIGURA 5.21 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS LINEARES E NÃO LINEARES EM TENSÕES MÉDIAS POR DEVIATÓRICAS	56
FIGURA 5.22 SENSOR TRIAXIAL E UNIDADE DE AQUISIÇÃO E GRAVAÇÃO DO SINAL, RETIRADO DE (JOSÉ NUNO VARANDAS, SILVA, AND SILVA 2013).....	57
FIGURA 5.23 ESQUEMA DE FIXAÇÃO E MONTAGEM DOS GEOFONES NAS TRAVESSAS, RETIRADO DE (JOSÉ NUNO VARANDAS, SILVA, AND SILVA 2013).....	58
FIGURA 5.24 FOTOGRAFIA DA LOCALIZAÇÃO DOS GEOFONES NOS ENSAIOS REALIZADOS NO DIA 06/06/12, RETIRADO DE (JOSÉ NUNO VARANDAS, SILVA, AND SILVA 2013)	58
FIGURA 5.25 GRÁFICO COM A DISCREPÂNCIA DE VALORES DAS 12:05 HORAS.....	59
FIGURA 5.26 GRÁFICO COM SINAIS DE VELOCIDADES ORIGINAIS DOS HORÁRIOS SELECIONADOS	60
FIGURA 5.27 GRÁFICO COM SINAIS DE VELOCIDADES COM ALTERAÇÕES DO TEMPO	60
FIGURA 5.28 VELOCIDADES COM AJUSTE DO TEMPO DOS ENSAIOS AO <i>PEGASUS</i>	62
FIGURA 5.29 AMPLITUDE DAS VELOCIDADES POR FREQUÊNCIA COM TEMPO DOS ENSAIOS E O <i>PEGASUS</i> AJUSTADOS	62
FIGURA 5.30 AMPLITUDE DAS VELOCIDADES POR FREQUÊNCIA COM TEMPO DOS ENSAIOS E O <i>PEGASUS</i> AJUSTADOS FILTRADAS.....	63
FIGURA 5.31 VELOCIDADES FILTRADAS NO TEMPO	63
FIGURA 5.32 DESLOCAMENTOS COM TEMPO DOS ENSAIOS AJUSTADOS AO <i>PEGASUS</i>	64
FIGURA 5.33 DESLOCAMENTOS COM RETAS DE AJUSTE	65
FIGURA 5.34 DESLOCAMENTOS AJUSTADOS.....	65
FIGURA 5.35 AMPLITUDES DAS FREQUÊNCIAS DOS DESLOCAMENTOS.....	66
FIGURA 6.1 COMPARAÇÃO DOS MÓDULOS RESILIENTES ENTRE ASIC E GRANITO DO ENSAIO MR PÓS DP I	70
FIGURA 6.2 LOCALIZAÇÃO DOS ELEMENTOS UTILIZADOS PARA OS ESTUDOS DE TENSÕES DOS MATERIAIS ALTERNATIVOS, ADAPTADO DE (PAIXÃO ET AL. 2016)	70
FIGURA 6.3 EVOLUÇÃO DOS MÓDULOS RESILIENTES AO LONGO DO TEMPO, DE BALASTRO GRANÍTICO	71
FIGURA 6.4 EVOLUÇÃO DOS MÓDULOS RESILIENTES AO LONGO DO TEMPO, DE BALASTRO DE ASIC ...	71
FIGURA 6.5 COMPARAÇÃO ENTRE ASIC E GRANITO NOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DO TEMPO, NA EXTREMIDADE TRAVESSA.....	72
FIGURA 6.6 COMPARAÇÃO ENTRE ASIC E GRANITO NOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DO TEMPO, NO CARRIL	73
FIGURA 6.7 COMPARAÇÃO DAS TENSÕES σ_z NAS CAMADAS DE BALASTRO DE GRANITO E DE ASIC NO PLANO xy	74
FIGURA 6.8 COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO NO TEMPO DAS TENSÕES NORMAIS E DE CORTE NAS CAMADAS DE BALASTRO DE GRANITO E DE ASIC	75
FIGURA 6.9 COMPARAÇÃO TENSÕES MÉDIAS E DEVIATÓRICAS AO LONGO DO TEMPO NOS ELEMENTOS A A F NAS CAMADAS DE BALASTRO DE GRANITO E DE ASIC	77
FIGURA 6.10 COMPARAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÕES NO ESPAÇO (p, q) NOS ELEMENTOS A, B E C NAS CAMADAS DE BALASTRO GRANÍTICO E DE ASIC	78

FIGURA 6.11 EVOLUÇÃO DOS MÓDULOS RESILIENTES AO LONGO DO TEMPO, DE ASIC SEM BORRACHA	79
FIGURA 6.12 EVOLUÇÃO DOS MÓDULOS RESILIENTES AO LONGO DO TEMPO, DE ASIC COM 1,0% DE BORRACHA.....	79
FIGURA 6.13 EVOLUÇÃO DOS MÓDULOS RESILIENTES AO LONGO DO TEMPO, DE ASIC COM 2,5% DE BORRACHA.....	80
FIGURA 6.14 EVOLUÇÃO DOS MÓDULOS RESILIENTES AO LONGO DO TEMPO, DE ASIC COM 5,0% DE BORRACHA.....	80
FIGURA 6.15 AVALIAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE BORRACHA EM BALASTRO DE ASIC NOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DO TEMPO, NA EXTREMIDADE TRAVESSA.....	81
FIGURA 6.16 AVALIAÇÃO DO ACRÉSCIMO DE BORRACHA EM BALASTRO DE ASIC NOS DESLOCAMENTOS AO LONGO DO TEMPO, NO CARRIL.....	82
FIGURA 6.17 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACRÉSCIMO DE BORRACHA EM BALASTRO DE ASIC NAS TENSÕES σ_z ; CORTE NO PLANO xy	83
FIGURA 6.18 TENSÕES NORMAIS E DE CORTE, AO LONGO DO TEMPO NO ELEMENTO A - BALASTRO DE ASIC SEM BORRACHA	84
FIGURA 6.19 TENSÕES NORMAIS E DE CORTE, AO LONGO DO TEMPO NO ELEMENTO A - BALASTRO DE ASIC COM 1,0% DE BORRACHA	84
FIGURA 6.20 TENSÕES NORMAIS E DE CORTE, AO LONGO DO TEMPO NO ELEMENTO A - BALASTRO DE ASIC COM 2,5% DE BORRACHA	85
FIGURA 6.21 TENSÕES NORMAIS E DE CORTE, AO LONGO DO TEMPO NO ELEMENTO A - BALASTRO DE ASIC COM 5,0% DE BORRACHA	85
FIGURA 6.22 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE BORRACHA NA CAMADA DE BALASTRO COM ASIC, EM TENSÕES MÉDIAS E DEVIATÓRICAS AO LONGO DO TEMPO, NO ELEMENTO A	86
FIGURA 6.23 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE BORRACHA NA CAMADA DE BALASTRO COM ASIC, EM TENSÕES MÉDIAS E DEVIATÓRICAS AO LONGO DO TEMPO, NO ELEMENTO B	86
FIGURA 6.24 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE BORRACHA NA CAMADA DE BALASTRO COM ASIC, EM TENSÕES MÉDIAS E DEVIATÓRICAS AO LONGO DO TEMPO, NO ELEMENTO C	87
FIGURA 6.25 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE BORRACHA NAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO DA CAMADA DE BALASTRO COM ASIC NO ESPAÇO (p, q)	88

Índice de Tabelas

TABELA 3.1 DADOS DAS MISTURAS COM BORRACHA UTILIZADOS NOS ENSAIOS LABORATORIAIS, ADAPTADO DE (SIGNES ET AL. 2015).....	17
TABELA 3.2 IMPACTO DO ACRÉSCIMO DE BORRACHA NO PARÂMETRO K1 PARA AS CORRESPONDENTES MISTURAS DE BORRACHA.....	19
TABELA 5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS CONSTANTES PARA CALIBRAÇÃO DOS ELEMENTOS DA SUPERESTRUTURA (JOSÉ NUNO VARANDAS, SILVA, AND SILVA 2013)	36
TABELA 5.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS CONSTANTES PARA CALIBRAÇÃO DAS CAMADAS DA SUBESTRUTURA (JOSÉ NUNO VARANDAS, SILVA, AND SILVA 2013)	36
TABELA 5.3 ESPESSURAS DAS CAMADAS DA SUBESTRUTURA CONSIDERADAS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO	39
TABELA 5.4 PARÂMETROS DOS CORPOS RÍGIDOS DO BOGIE MODELADA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO (ADTRANZ 2000)	40
TABELA 5.5 PARÂMETROS DOS ELEMENTOS DE SUSPENSÃO DO BOGIE MODELADA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO (ADTRANZ 2000)	40
TABELA 5.6 PARÂMETROS K1 E K2 DOS MODELOS UTILIZADOS.....	47
TABELA 5.7 HORÁRIOS COM RESPECTIVOS GEOFONES UTILIZADOS NO DIA 06/06/12, RETIRADO DE (JOSÉ NUNO VARANDAS, SILVA, AND SILVA 2013).....	59
TABELA 5.8 PARÂMETROS ADOTADOS PARA O MODELO DE CALIBRAÇÃO	61
TABELA 6.1 PARÂMETROS DO ASIC E AGREGADO GRANÍTICO ENSAIADOS E ADAPTADOS AO <i>PEGASUS</i>	69
TABELA 6.2 PARÂMETROS NÃO-LINEARES DE ASIC COM RESPECTIVAS PERCENTAGENS DE BORRACHA	78

Lista de abreviaturas e símbolos

Convenção

α, A Escalar

\mathbf{a} Vetor

\mathbf{A} Matriz

Subscrito

$\alpha_{a,b}$ Referente à interação travessa-balastro

$\alpha_{a,w}$ Referente à interação veículo-via

α_b Referente ao balastro

α_g Referente à gravidade

α_{rp} Referente às palmilhas de carril

α_s Referente à subestrutura da via

α_t Referente à superestrutura da via

α_v Referente ao veículo

Símbolos Latinos

\mathbf{C} Matriz de amortecimento

\mathbf{K} Matriz de rigidez

\mathbf{M} Matriz de massa

\mathbf{D} Matriz de rigidez constitutiva

\mathbf{f} Vetor das forças

u, \mathbf{u}	Deslocamento
v	Velocidade
a	Aceleração
E	Módulo de Young
E_r	Módulo Resiliente
I	Momento de inércia
x	Posição na direção longitudinal da via
y	Posição na direção transversal da via
z	Posição na direção da profundidade da via

Símbolos Gregos

ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Massa volúmica
ε	Tensor das deformações
σ	Tensor das tensões
ξ	Fator de amortecimento
ξ	Coeficiente de amortecimento de Rayleigh
θ	Rotação
θ	somatório das tensões principais
θ_0	tensão de referência
ω	Frequência radial

Abreviaturas

MEF	Métodos dos Elementos Finitos
MDF	Método das Diferenças Finitas
ASIC	Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
3D	Três dimensões

1 Introdução

1.1. Enquadramento

Os caminhos de ferro foram muito utilizados como meio de transporte ao longo do século XIX, devido a sua grande capacidade de transportar cargas elevadas através de grandes distâncias. Mas durante o século XX, com o surgimento dos primeiros automóveis, a concorrência entre estes transportes teve grande impacto na economia mundial.

No final do século XX e início do XXI a preocupação com a sustentabilidade do planeta terra, devido as alterações climáticas, originadas pela elevada quantidade de dióxido de carbono liberada na atmosfera pela ação humana, levou à adoção de medidas para a redução deste gás no meio ambiente, sendo uma delas a diminuição de veículos que utilizam combustíveis fósseis, sendo uma alternativa ambientalmente preferível o aumento da utilização de comboios como meio de transporte.

Os comboios, se comparados com veículos automóveis, contêm a grande vantagem ecológica de produzirem uma quantidade de poluentes muito reduzida, relacionando o número de passageiros transportados a grandes distâncias.

A partir de meados da década de setenta desenvolveram-se os projetos de linhas novas na Europa, destinadas à alta velocidade, a primeira das quais entrou em serviço em 1981 com uma velocidade comercial de 260 km/h (Fortunato 2005).

Com o aumento das velocidades dos comboios, a complexidade das análises do sistema de interação comboio-via e via-balastro aumentou, principalmente pelos efeitos dinâmicos, e aumentou também a velocidade de degradação da geometria das vias.

As vibrações das vias-férreas podem assumir problemáticas em relação aos efeitos dinâmicos, podendo afetar estruturas existentes na proximidade da via.

O conforto dos passageiros destes transportes, assim como dos moradores das proximidades da via, deve ser assegurado. Este fator é condicionado pela vibração da caixa do comboio e pelo ruído gerado por este fenómeno, sendo determinante no dimensionamento destas estruturas.

Por outro lado, os avanços tecnológicos permitiram modelações numéricas e ensaios cada vez mais detalhados e refinados ao longo do tempo, permitindo-se assim, que a mitigação destas problemáticas se otimizassem.

A necessidade da melhoria de desempenho das vias balastradas, levou a utilização de diferentes tipos de materiais para as camadas granulares dessa infraestrutura, nomeadamente o balastro, o sub-balastro e o coroamento. A escolha de materiais alternativos é condicionada pelas suas propriedades mecânicas, geométricas e de sustentabilidade.

Os materiais alternativos utilizados para análise no presente documento são o ASIC (Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção) e a borracha. Suas importâncias estão explicadas no seguimento da presente dissertação, tendo em consideração o seu contributo na utilização de materiais ecologicamente sustentáveis.

1.2. Motivação

As práticas humanas no contexto mundial, ao longo dos últimos séculos, são de natureza insustentável, no que se refere a produção de resíduos utilizados de formas descartáveis, onde deveriam ter finalidade ao serem reutilizados. A adaptação do ser humano às problemáticas em curso e previstas no futuro, geradas a partir desta má gestão dos materiais, tem sido debatida nas grandes potências mundiais.

A temática da sustentabilidade é de grande interesse para o autor. O estudo do desempenho de um material alternativo e reciclável, a ser incorporado em camadas granulares do sistema de transporte das vias férreas, é um grande passo para a consciencialização, não só na área deste tipo de transporte, mas de diversas áreas com grandes desenvolvimentos sobre este tema.

Perspetiva-se que a utilização de materiais não tradicionais provenientes de processos de aproveitamento de resíduos industriais, como as misturas de ASIC com borracha, permitam a redução de impactos ambientais, assim tornando este sistema mais sustentável. No entanto, para a sua aplicação, são necessários elementos de prova de base científica que comprovem a sua viabilidade e conveniência estrutural e funcional.

Uma vez que não existem muitos estudos na literatura da especialidade que se tenham debruçado sobre a utilização deste tipo de materiais, especialmente utilizando ferramentas de simulação numérica para análise estrutural do comportamento dinâmico de interação via-veículo, considerou-se oportuno desenvolver este estudo para se obter um conhecimento mais aprofundado sobre o tema.

Caso os comportamentos dos materiais alternativos cumpram com os requisitos do sistema em que estão incorporados, será uma grande mais-valia para o desenvolvimento sustentável deste tipo de transporte.

1.3. Objetivo

O objetivo primordial desta dissertação é a análise estrutural de infraestruturas ferroviárias concebidas com materiais não tradicionais reciclados, a fim de contribuir para a sua calibração como substituto viável à construção tradicional feita com materiais naturais.

Para esse efeito, persegue-se primeiramente a calibração de modelos numéricos representativos construídos com o programa *Pegasus*, a partir do estudo de parâmetros do sistema ferroviário, para a aproximação de ensaios realizados *in situ*.

Em sequência, é feita a simulação sistemática da utilização de materiais ecologicamente sustentáveis, ASIC e partículas de borracha (provenientes da trituração de pneus com seus períodos de vida útil ultrapassados), em alternativa aos agregados convencionais, graníticos. Estas simulações têm como objetivo, avaliar o desempenho destes materiais na camada de balastro das linhas de ferro, balastradas.

A redução das tensões e dos efeitos dinâmicos em todas as camadas, compostas por materiais granulares, são os pontos principais de análise destes estudos paramétricos.

1.4. Estrutura do documento

O presente documento está composto por seis capítulos. O atual capítulo refere-se à introdução onde aborda o tema desta dissertação.

O segundo capítulo abrange uma breve apresentação das componentes do sistema das vias-férreas, de forma a expor as características e funções de cada elemento, correspondente ao sistema do tipo de transporte, abordado neste documento.

O conteúdo do terceiro capítulo descreve o modelo numérico, utilizado para o estudo desempenhado, a partir de uma breve introdução, sobre as ferramentas computacionais, e posteriormente a caracterização da modelação numérica adotada.

O capítulo seguinte corresponde a calibração do modelo numérico, por um processo iterativo, a partir da comparação de seus resultados e de ensaios realizados *in situ*.

Com base nos resultados calibrados no capítulo anterior, o capítulo 5, refere-se aos estudos paramétricos efetuados com o programa *Pegasus*, para avaliar o comportamento da camada de balastro. Estes estudos estão subdivididos em três grandes grupos de comparação. Primeiro entre modelos lineares e não lineares, segundo entre ASIC e granito, e por fim os impactos da adição de borracha em conjunto com materiais granulares.

Por fim, o último capítulo conclui com observações, elaboradas a partir do documentado no presente trabalho. Em seguida, abordando possíveis trabalhos futuros, que poderão ser desenvolvidos para complementar os resultados presentes neste documento.

2. Descrição das vias-férreas balastradas

2.1. Contextualização

As vias-férreas são a estrutura na qual os veículos ferroviários circulam. A ferrovia suporta o peso dos veículos e guia-os, ao contrário das rodovias, onde as estradas simplesmente atuam como uma superfície adequada para os veículos circularem (Rodrigues 2017).

Existem dois tipos de construção de caminhos de ferro: balastradas e em laje, sendo a primeira composta por materiais granulares nas camadas de apoio das travessas e a segunda por plataforma de betão na mesma zona.

As vias balastradas, por serem a primeira forma estrutural a ser desenvolvido nesta área, contêm mais anos de utilização. Com vasta gama de trabalhos e análises do comportamento de seus elementos constituintes, é a solução construtiva com maior utilização no mundo em termos ferroviários.

As grandes vantagens dos sistemas balastrados, se comparados aos em laje, são nomeadamente, menores custos de investimento inicial e maior rapidez em seu processo construtivo e de manutenção, por apresentarem materiais granulares em sua composição estrutural. Seus elementos integrantes, apresentam comportamento de amortecimento das vibrações, no instante da passagem do veículo sobre sua estrutura, mais eficaz. A maior facilidade de correção da geometria da via e alteração de seu traçado são outros dois fatores vantajosos. Por outro lado, os materiais granulares comprometem sua resistência lateral, degradando mais facilmente este tipo de via, sendo assim necessário reparações mais frequentes.

O presente capítulo terá como base a caracterização das vias balastradas, por ser o tipo de via-férrea mais comum e que se prevê que beneficie com a inclusão destes materiais alternativos. Também será este tipo de via-férrea que será utilizado para calibração do modelo e avaliação dos efeitos dinâmicos da comparação entre os materiais granulares graníticos e ASIC.

2.2. Elementos das vias-férreas balastradas

A via balastrada é uma solução estrutural que, pelas suas características, tem um bom comportamento dinâmico considerando as ações provocadas quer pelo movimento das massas suspensas do veículos, aquelas acima do sistema de eixos, quer pelo movimento das massas não suspensas, que são as que constituem as rodas, o eixo e todas as peças ou equipamentos a eles rigidamente ligados (Fortunato 2005).

O tipo de via em estudo no presente documento é do tipo balastrada. Esta pode ser subdividida em superestrutura e subestrutura. A primeira é constituída por carril, fixação do carril, travessas e palmilhas de carril e travessa. A segunda pelas camadas de balastro, sub-balastro, coroamento e fundação. Esta subdivisão depende da autoria, sendo que alguns autores consideram o balastro na zona da superestrutura. No caso presente, optou-se em utilizar a separação das subdivisões por armação de via e elementos granulares, facilitando as referências de cada elemento.

Os esquemas a seguir, representam os elementos constituintes da via em um corte longitudinal Figura 2.1 e transversal Figura 2.2 da via, oferecendo uma melhor compreensão da disposição destes em profundidade.

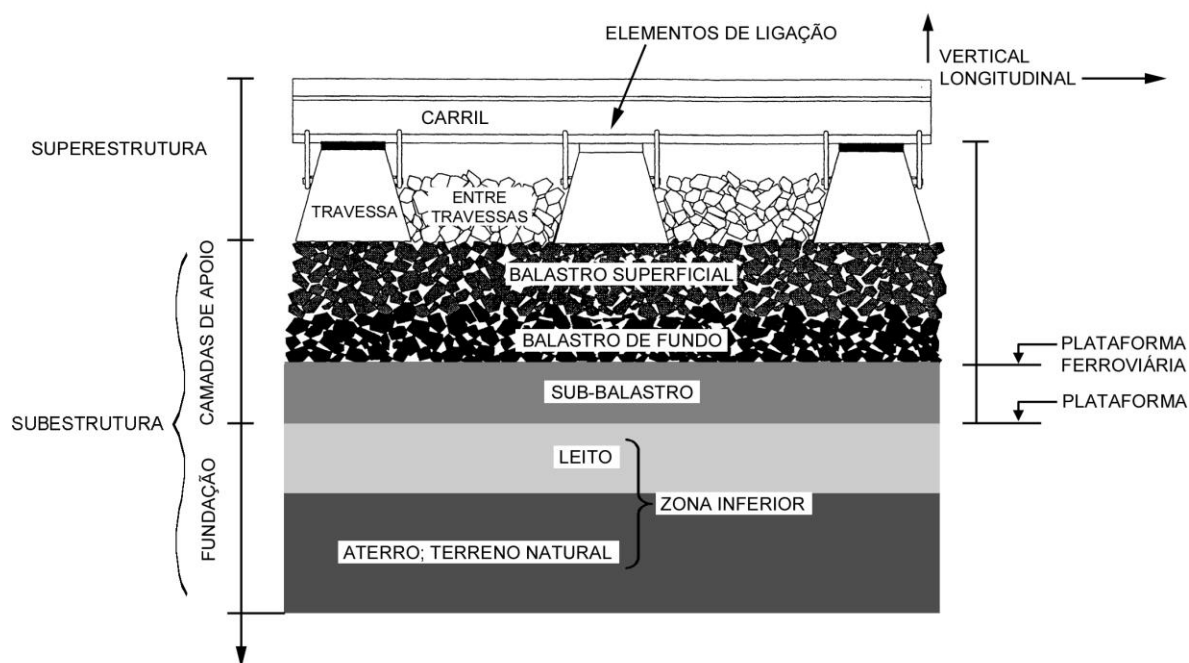


Figura 2.1 esquema estrutural do perfil longitudinal da via balastrada, retirado de (Fortunato 2005)

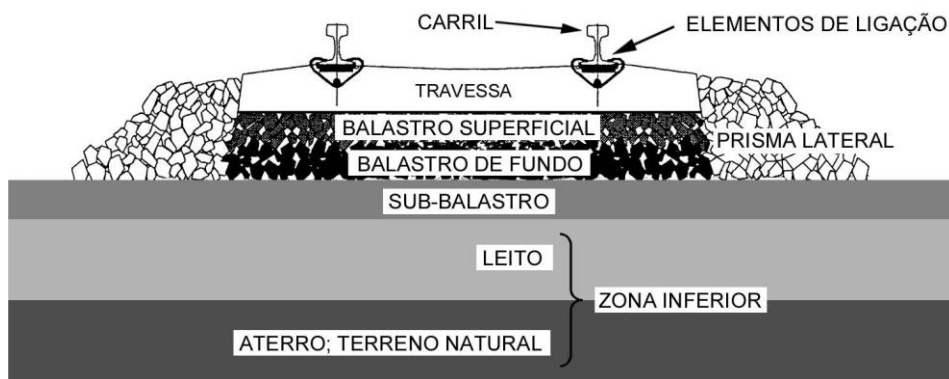


Figura 2.2 esquema estrutural do perfil transversal da via balastrada, retirado de (Fortunato 2005)

O que condiciona a escolha do tipo de elementos são: a acessibilidade da matéria prima que compõe cada elemento da via; e sua adaptação aos diferentes tipos de ações impostos respetivamente, desta forma impedindo a degradação da via.

No seguimento deste subcapítulo os respetivos elementos são descritos de forma sucinta para a melhor compressão de suas funções no sistema.

2.2.1. Carris

Os carris são elementos longitudinais e mais a montante da infraestrutura ferroviária, como se pode observar nos esquemas da Figura 2.1 e Figura 2.2. Estes elementos são dimensionados, tradicionalmente em aço, para assegurar a resistência necessária às ações atuantes.

Os esforços nos carris, gerados pela passagem do veículo ferroviário e pela sua dilatação, ocasionada pela variação térmica (Paixão 2010), devem ser transmitidos e atenuados para níveis de solicitação compatíveis com os elementos subjacentes, nos sentidos verticais, transversais e longitudinais.

Usualmente, o carril é considerado como um dos elementos mais importante da via, pois apresenta como principal função guiar o material circulante. Esta função é assegurada pela forma da cabeça do carril, pela existência da pestana e da conicidade das rodas (Paixão 2010).

A bitola, um parâmetro geométrico das vias férreas, é a distância entre as faces interiores das cabeças dos carris. A sua precisão e manutenção são fundamentais para o bom comportamento dos caminhos de ferro. A sua dimensão não é uniforme entre as redes ferroviárias mundiais, mas a dimensão mais usual é de 1435 mm. No caso de Portugal e Espanha, as vias férreas apresentam bitola ibérica, com 1,668 mm (Rodrigues 2017).

2.2.2. Elementos de ligação

Os elementos de ligação correspondem a todas as componentes que compõem a conexão estrutural entre carril e travessa, como observa-se na Figura 2.1 e Figura 2.2. Este sistema tem a função de transmitir os esforços dos carris para as travessas, sem sofrer deformações permanentes, para prevenir movimentos do carril horizontais (no sentido transversal e longitudinal) e rotações (no eixo longitudinal) para amortecer vibrações e impactos causados pelo material circulante e isolar eletricamente as travessas dos carris (Esveld 2001).

As palmilhas de carril são elementos planos de pouca espessura (normalmente 10 mm). Os materiais mais comuns que as compõem são polímeros e materiais compósitos. Estes elementos foram desenvolvidos para amortecer as vibrações, geradas pelos efeitos dinâmicos produzidos pela interação roda-carril, distribuindo as cargas para as travessas de forma mais eficaz, mais próximo da uniformidade, caso comparada com sua ausência. (Rodrigues 2017)

2.2.3. Travessas

As travessas são elementos normalmente prismáticos alongados, com sua maior dimensão no sentido transversal da via, situadas entre os carris e a subestrutura, como ilustrado na Figura 2.1 e Figura 2.2. Estes elementos apresentam elevada importância para garantir a dimensão correta da bitola, a estabilidade à via, minimizar o desenvolvimento dos defeitos de via no plano transversal e atenuar as cargas transmitidas do carril aos elementos granulares da via.

Os materiais desse elemento devem apresentar a resistência mecânica adequada, quer na direção vertical quer na horizontal. Os materiais mais comuns que as compõe são madeira e betão armado pré-esforçado, sendo o plástico e aço outros materiais menos utilizados (Rodrigues 2017).

Na Europa, desde o século XX, as travessas de betão armado têm vindo a substituir as de madeira. A priorização por esta solução foi gerada por dois fatores principais: o crescimento da produção de betão e a escassez de madeira; o melhor desempenho das travessa de betão armado (de 200 até 300 kg) face às de madeira (100 kg), por apresentarem maior resistência ao desgaste e peso, além de maior tempo de vida útil (Rodrigues 2017).

2.2.4. Balastro

A camada de balastro é a camada mais superficial da subestrutura, como se pode observar na Figura 2.1 e Figura 2.2. Habitualmente divide-se a camada de balastro em: i) balastro entre travessas; ii) prisma lateral; iii) balastro superficial, que constitui a subcamada superior que é afetada diretamente durante as ações mecânicas de conservação; iv) balastro de fundo, que constitui a subcamada inferior e que, geralmente, ao fim de alguns anos de exploração se encontra com uma granulometria relativamente distinta da inicial. (Fortunato 2005)

Esta camada é composta por materiais granulares grosseiros sem coesão, com uma elevada resistência mecânica, cujo comportamento depende da interação de suas partículas, determinada pela forma angular, rugosidade e resistência mecânica destas.

Com as funções de garantir a estabilidade da geometria da via; promover uma boa drenagem das águas pluviais e o escoamento de material poluente, originado do material circulante ou de outras naturezas; elasticidade da via, com a finalidade de amortecer as cargas dinâmicas; permitir uma fácil correção da posição da via através da sua alteração; promover a distribuição homogênea dos esforços para as camadas inferiores

2.2.5. Sub-balastro

A camada de sub-balastro, interposta entre a camada de balastro e a fundação, como esquematizado na Figura 2.1 e Figura 2.2, aparece devido à necessidade de proteger a plataforma e para reduzir o nível de tensão nos solos, mantendo constante a espessura do balastro. Esta espessura, em geral, é estabelecida à partida e convém que seja constante ao longo de toda a linha, para possibilitar, durante as operações de conservação e reabilitação, uma utilização sistemática dos equipamentos mecânicos (Fortunato 2005).

Como os elementos já referidos, esta camada granular deve conferir uma boa distribuição das cargas de seus elementos superiores para as camadas inferiores. Normalmente utilizam-se materiais naturais bem graduados, areias cascalhentas, compostas em central, materiais naturais britados ou detritos de pedreiras. As partículas devem ter boa resistência ao desgaste com uma granulometria de vasta variedade para impermeabilizar a base da camada de balastro, escoando as águas em sua superfície com inclinação transversal adequada, limitando a interpenetração de material entre esta e as camadas adjacentes (Fortunato 2005).

Nem todas as vias-férreas, especialmente as mais antigas, incluem a camada de sub-balastro. A ausência desta camada pode conduzir a uma degradação mais rápida da via, e, consequentemente, a maiores esforços de manutenção (Paixão 2010).

2.2.6. Coroamento

A camada de coroamento ou leito da via localiza-se entre a camada de sub-balastro e de fundação, como ilustrado na Figura 2.1 e Figura 2.2. Esta camada é usualmente constituída por geomateriais de qualidade superior aos da fundação que permite uma transição suave entre a camada de sub-balastro e o solo de fundação, visando garantir melhor capacidade de suporte às camadas superiores, como o balastro e o sub-balastro, face à colocação direta sobre os solos de fundação (Correia 2015).

2.2.7. Fundação

A camada de fundação é o meio onde se apoiam as camadas de balastro, sub-balastro e (ou) coroamento e prolonga-se em profundidade até onde se fazem sentir de forma significativa as solicitações do tráfego, como na Figura 2.1 e Figura 2.2 acima (Fortunato 2005). Caso necessário, deve ser devidamente tratada de forma a corresponder com as necessidades do tipo de linha de ferro e veículo de transporte. Normalmente composta por solo natural da zona de implementação com a função principal de suporte de todo o sistema.

As características e o comportamento dos materiais que constituem a fundação condicionam o dimensionamento e a construção das camadas de apoio, de tal forma que em muitos casos é necessário substituir os solos, ou promover o seu melhoramento (Fortunato 2005).

3. Materiais alternativos para camadas de vias-férreas

3.1. Contextualização

Na entrada do século XXI, a preocupação por medidas renováveis de reciclagem de materiais para engenharia civil aumentou de forma exponencial devido a má utilização dos recursos naturais nas construções e em outras áreas. Desta forma, medidas sustentáveis foram desenvolvidas, como a reutilização de matérias, anteriormente descartáveis, em alguns métodos construtivos.

A economia circular, temática com elevada importância no atual contexto, desempenha função fulcral no desenvolvimento das economias futuras. Este conceito, em contraponto à economia linear que visa apenas o lucro a partir da utilização e descarte dos produtos, incorpora a preocupação com a sustentabilidade ecológica do meio ambiente, a partir do incentivo da reutilização e reciclagem de materiais residuais em seu sistema económico, após o fim de suas respectivas vidas úteis (Delgado 2019).

A partir desta filosofia, o descarte de resíduos no meio ambiente é otimizado, diminuindo a poluição de todo o ecossistema global, gerando um mundo mais produtivo e sustentável a longo prazo.

No seguimento deste capítulo, serão descritos dois materiais alternativos, as escórias de aciaria e as partículas de borracha que são o objeto de estudo deste trabalho.

Com grandes benefícios ecológicos, estes materiais têm vantagens promissoras, em relação a implementação destes nas camadas granulares das vias-férreas.

Para cada material, é descrito um caso de ensaio laboratorial, com resultados utilizados para estudos paramétricos, realizados no presente documento.

3.2. Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)

3.2.1. Aspetos gerais

Sendo os agregados naturais, o terceiro recurso natural mais utilizado em todo o mundo e a indústria produtora de aço, uma grande geradora de resíduos (escórias) com potencial de serem valorizados como agregados, o seu estudo é fundamental, à luz das atuais políticas de gestão integrada de resíduos (Ferreira 2010).

A produção mundial de aço bruto passou de 30×10^6 toneladas em 1901 para $1,33 \times 10^9$ toneladas em 2008. A escória de aciaria gerada é cerca de 12% a 16% em massa da produção de aço mundial, pelo que em 2008 foram gerados em todo o mundo cerca de 190×10^6 toneladas de escória, com potencial de valorização. Em Portugal produzir-se-ão a médio prazo mais de 400×10^3 toneladas por ano deste material. (Ferreira 2010)

O aço pode ser obtido basicamente através de dois processos siderúrgicos: via siderurgia integrada ou semi-integrada, onde a diferença principal reside no fato de que no primeiro, o aço provem exclusivamente da redução do minério de ferro, e no segundo, da fusão de sucata metálica (Delgado 2019).

Na siderurgia integrada, as matérias-primas necessárias para a obtenção do aço são o minério de ferro (principalmente a hematita) e o carvão mineral (Delgado 2019).

A siderurgia semi-integrada é um método mais moderno, em que o aço produzido muitas vezes não utiliza minério de ferro, procedendo-se a fusão direta de sucatas metálicas geralmente misturadas diretamente com ferro gusa, o que além da eficiência industrial, advinda da eliminação de uma etapa (redução do minério de ferro), acrescenta uma mais-valia ambiental a este processo de fabricação. É neste método que se enquadra a produção de aço em fornos de arco elétrico (Delgado 2019). Este é o caso de produção de aço utilizado para gerar o agregado alternativo dos estudos realizados no presente documento.

As escórias de aciaria obtidas dos fornos de arco elétrico, tal e qual saem do forno, são somente um aglomerado de restos de aço com materiais inorgânicos, não sendo possível empregá-las diretamente em qualquer aplicação de engenharia. No entanto, as escórias podem passar por um processamento, visando aproveitamento na indústria da construção civil, originando o que se denomina em Portugal de “Agregado Siderúrgico Inerte para Construção” (ASIC) (Delgado 2019).

As escórias de aciaria podem ser, tanto oxidantes, como redutoras. As oxidantes vulgarmente chamadas de escórias negras, são produzidas pela injeção de oxigénio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre. As redutoras podendo ser denominadas por escórias brancas,

são geradas após o vazamento da escória oxidante através da adição de óxido de cálcio (Delgado 2019).

Dentre as escórias brancas e negras, somente o segundo tipo tem potencial de utilização em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas de maneira geral (Delgado 2019), assim no restante da presente dissertação os termos ASIC ou escória de aciaria, serão referentes às escórias negras.

Em estágio realizado no LNEC, o autor teve a oportunidade de colaborar em estudos relativos à caracterização de ASIC. Concretamente, a sua atividade focou-se na análise da evolução morfológica de uma amostra de 30 partículas que foram digitalizadas em 3D por fotogrametria.

Neste trabalho, através da manipulação e as análises efetuadas com o material, proporcionaram a familiarização do autor com o material onde foi possível constatar em primeira mão algumas características, como a textura, cor, elevada resistência à fragmentação e desgaste, elevada densidade, porosidade, angularidade das partículas que favorecem o imbricamento.

Para ilustrar a morfologia da escória de aciaria, são apresentadas duas fotografias. Sendo a primeira dos 15 agregados, com dimensões entre 31,5 e 40 mm, e a segunda, dos 15 restantes, entre 40 e 50 mm como mostra a Figura 3.1. Nesta imagem é evidente a forma angulosa do ASIC e a grande variedade geométrica das suas partículas, em comparação com as dos agregados naturais britados.



Figura 3.1 Fotografias das Amostras de ASIC utilizadas em estágio no LNEC

De maneira geral o agregado siderúrgico é um material duro, denso, limpo e resistente à abrasão. A elevada densidade das partículas e a alta resistência mecânica do agregado, observada em estudos para aplicações de engenharia, deve-se sobretudo às quantidades significativas de ferro presentes nas escórias (Delgado 2019).

Uma potencial aplicação do ASIC é como camada de balastro ferroviário, principalmente em função da grande maioria das usinas siderúrgicas instalarem-se, por questões de competitividade, próximas às malhas ferroviárias em praticamente todos os países (Delgado 2019).

3.2.2. Estudos laboratoriais sobre ASIC

Existem diversos estudos para aplicação deste material como alternativa para as camadas granulares que compõe as vias-férreas. As análises são elaboradas com a finalidade de avaliar, nomeadamente, seus comportamentos mecânicos, dinâmicos, físicos, químicos e morfológicos.

Os ensaios realizados para a avaliação do comportamento resiliente, de amostras com agregados graníticos e ASIC, são referentes aos trabalhos efetuados em (Delgado 2019). Posteriormente os parâmetros dos resultados destes ensaios são utilizados nos estudos paramétricos efetuados no subcapítulo (6.3). Assim, os ensaios relevantes são apresentados resumidamente, a seguir.

Como será apresentado em maior detalhe nos próximos capítulos, para a avaliação do comportamento da via com a aplicação de ASIC, foram comparados dois modelos, com a alteração das propriedades dos elementos da camada de balastro correspondente com o tipo de material em análise. Com o primeiro modelado para o material alternativo (ASIC) e o segundo com balastro convencional (granítico).

Os resultados laboratoriais utilizados para os estudos da presente dissertação, são os parâmetros não-lineares K_1 e K_2 dos ensaios triaxiais cíclicos para 1 milhão de ciclos de carga/descarga (DP I-A e DP I-G), originados dos trabalhos de (Delgado 2019). O gráfico da Figura 3.2, ilustra os resultados dos ensaios representados por círculos, para cada somatório das tensões principais (θ) e Módulos Resilientes (Er), e as curvas aproximadas de potências com as equações, dos respetivos materiais. É importante referir que os parâmetros não-lineares, estão explicados a seguir, no subcapítulo 4.3.

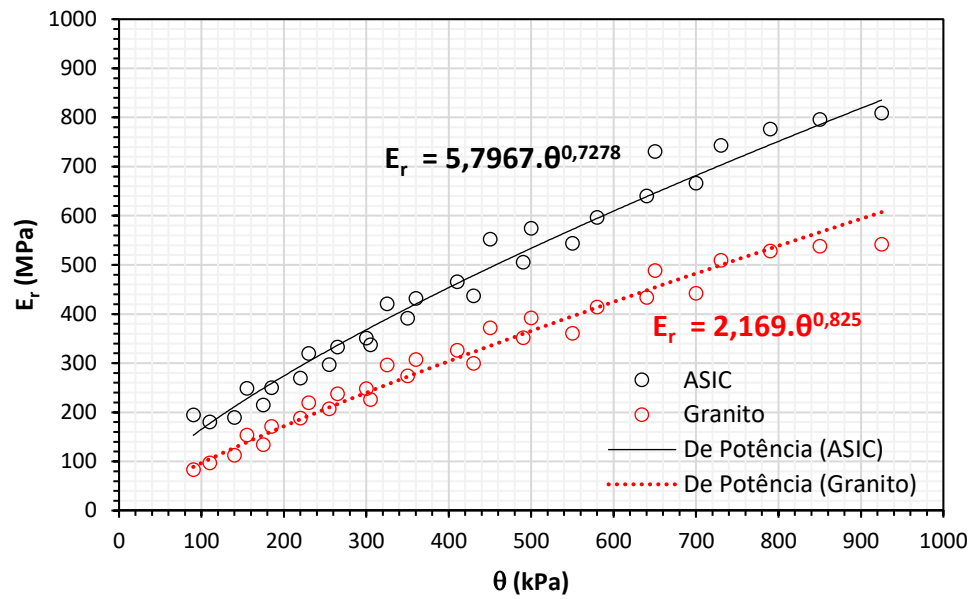


Figura 3.2 Gráfico dos Módulos Resilientes por somatório das tensões principais, retiradas dos trabalhos de (Delgado 2019)

O equipamento utilizado consistiu numa câmara triaxial de aplicação de cargas cíclicas cujo aspeto e diagrama se representam na Figura 3.3.

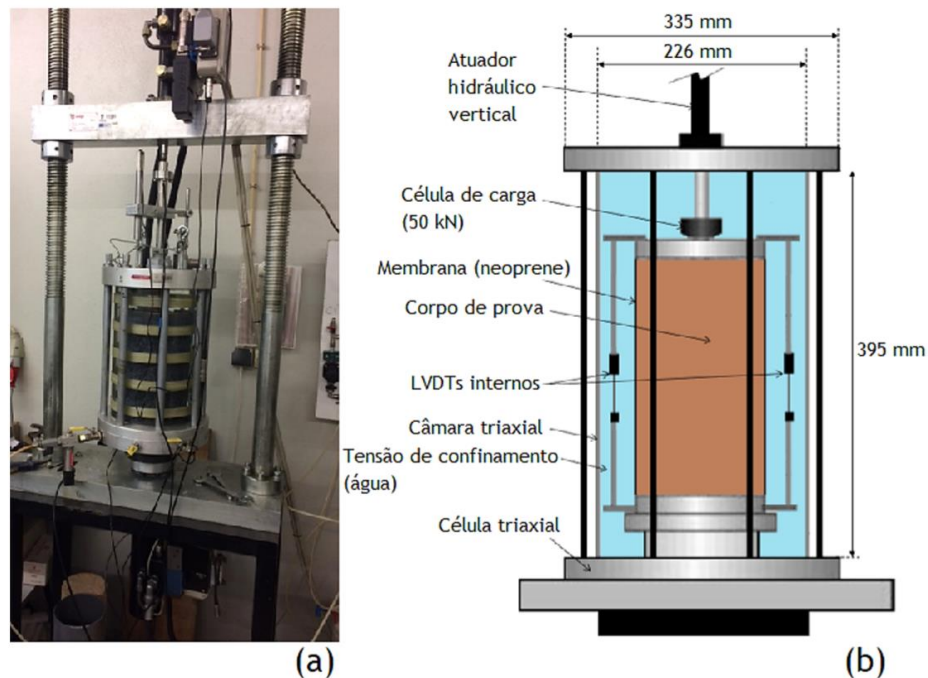


Figura 3.3 a) imagem do equipamento para ensaios triaxiais cíclicos, b) diagrama esquemático do equipamento (Delgado 2019).

3.3. Partículas de borracha

3.3.1. Aspetos gerais

Com a produção em larga escala de veículos automobilísticos nos séculos XX e XXI, o fabrico de pneus de borracha vem desempenhando grande rentabilidade, a nível económico. Apesar deste fator, esta componente dos automóveis levanta um grande debate, no que se refere a sua finalidade, após seu período de vida útil ser ultrapassado.

Quando as borrachas são queimadas, liberam partículas tóxicas (algumas cancerígenas) e gases de efeito estufa, um risco que também ocorre no caso de serem armazenadas. Outra opção tradicional é a disposição deste material em aterros, mas esta prática está cada vez sendo menos utilizada pelos riscos de poluição das águas subterrâneas. A nível europeu, já é completamente proibida (Signes et al. 2015).

Ao longo das últimas décadas, diversas propostas foram elaboradas em relação à solução desta problemática. No contexto da sustentabilidade ambiental, a reutilização da borracha de pneu, é o foco principal destas alternativas, sendo uma sugestão promissora, a utilização deste resíduo em infraestruturas como na construção de estradas e vias-férreas.

No presente documento, a opção de reutilização deste material é como material granular nas camadas compostas por agregados grosseiros, mais especificamente de balastro. Esta alternativa é originada de estudos anteriores com misturas de partículas de borracha, provenientes da trituração de pneus usados (Signes et al. 2015).

Para além da adição de borracha possibilitar a reutilização do material, também promove benefícios a nível da atenuação de vibrações nos sistemas ferroviários.

3.3.2. Estudos laboratoriais sobre partículas de borracha

Os estudos laboratoriais apresentados por (Signes et al. 2015), foram realizados para avaliar o a influência da introdução de partículas de borracha em misturas de agregados em camadas de apoio de infraestruturas ferroviárias. Os estudos paramétricos apresentados no subcapítulo 6.4 deste documento utilizam os resultados relativos ao comportamento resiliente de misturas com a adição de borracha. Assim, limitou-se a explicação apenas do ensaio correspondente a este comportamento. Um breve resumo do ensaio realizado é apresentado a seguir.

Uma das amostras de agregado foi selecionada para representar o sub-balastro convencional para ser comparada com as novas misturas.

Foram geradas quatro misturas adicionais de agregado com borracha, organizadas pela percentagem de borracha de 1,0, 2,5, 5,0 e 10%, em termos de peso. Todas as misturas foram testadas e posteriormente comparadas com os resultados obtidos para o agregado tradicional.

As misturas são compostas por partículas de borracha com até 20mm (Borracha 20), até 2 mm (Borracha 2), até 1 mm (Borracha 1) e sub-balastro convencional, ilustrados na Figura 3.4. A Tabela 3.1 apresenta a proporção de cada partícula para cada mistura.

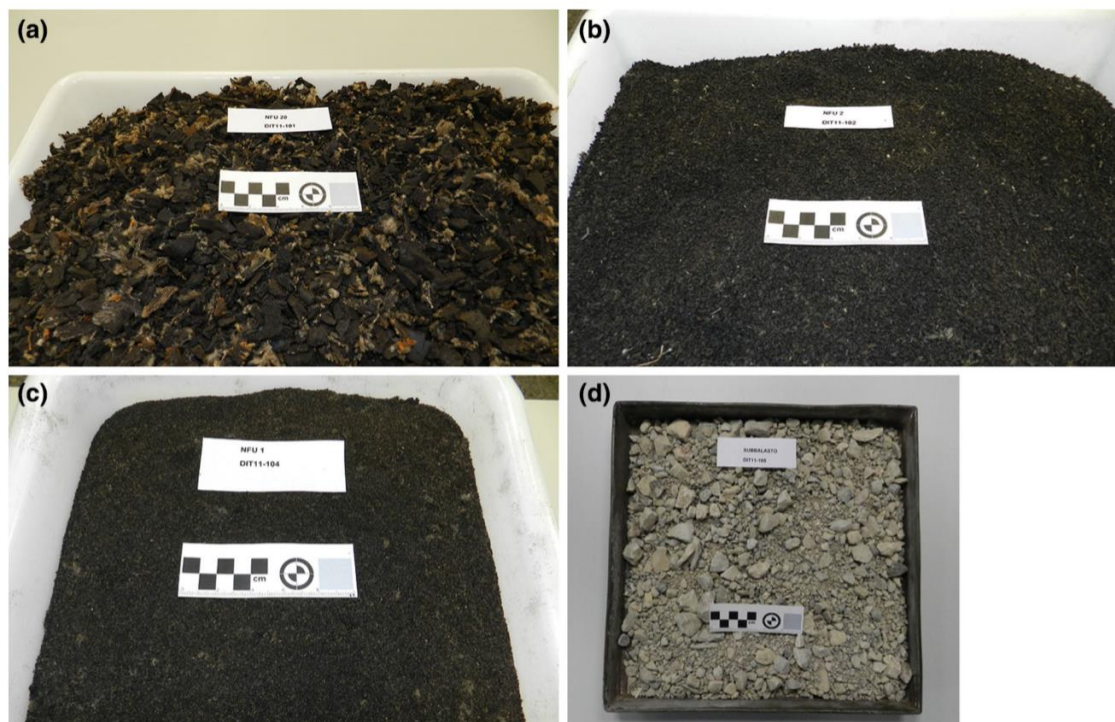


Figura 3.4 Componentes das amostras utilizadas nos testes laboratoriais, **a** Borracha 20. **b** Borracha 2. **c** Borracha 1. **d** Sub-balastro convencional (Signes et al. 2015)

Tabela 3.1 Dados das misturas com borracha utilizados nos ensaios laboratoriais, adaptado de (Signes et al. 2015)

Mistura	Agregado (%)	Borracha 20 (%)	Borracha 2 (%)	Borracha 1 (%)
1,0%	99,0	0,4	0,4	0,2
2,5%	97,5	1,0	1,0	0,5
5,0%	95,0	2,0	2,0	1,0
10,0%	90,0	4,0	4,0	2,0

A partir da avaliação destas misturas, o caso com 10% de borracha, apresentou dificuldades na compactação dos provetes por ter sido necessário aumentar drasticamente a quantidade de energia de compactação. Desta forma, naquele estudo, optou-se pela limitação de algumas avaliações com até 5% de borracha (Signes et al. 2015).

Foram realizados ensaios triaxiais de carregamento cíclico para avaliar o comportamento resiliente das amostras. O gráfico da Figura 3.5, representa os resultados dos ensaios, com as respectivas curvas de Módulo Resiliente (E_r) em função do primeiro invariante das tensões, θ (calculado pelo somatório das tensões principais) (Signes et al. 2015), onde podemos observar a diminuição de E_r , com o acréscimo de partículas de borracha.

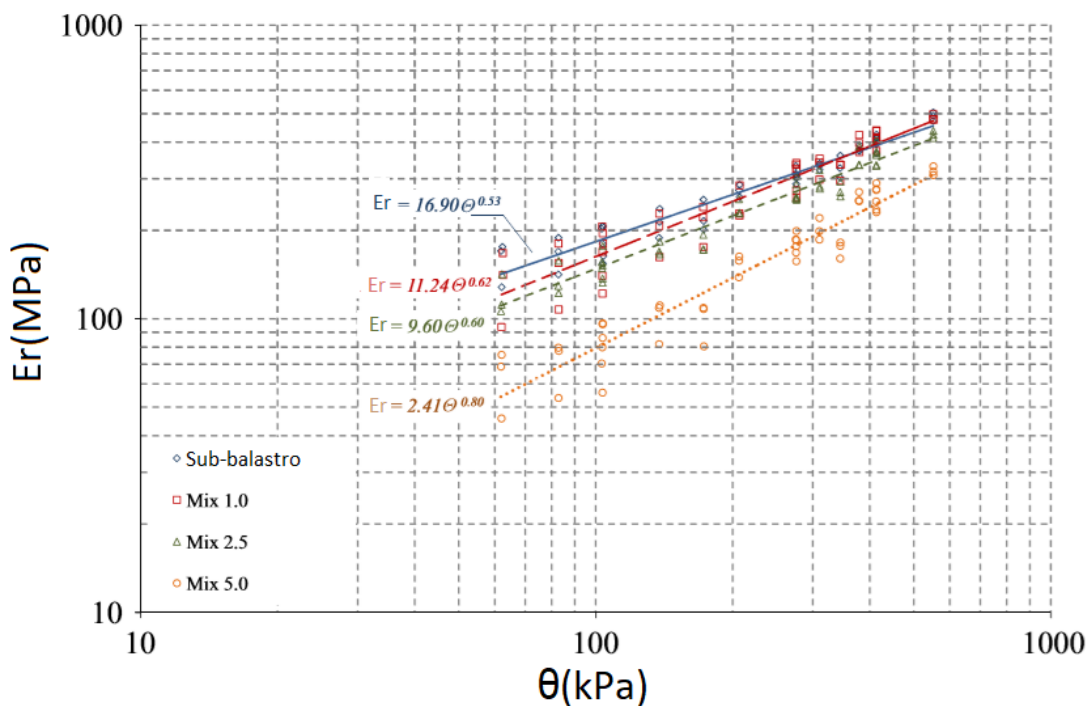


Figura 3.5 Curvas dos módulos resilientes para cada mistura de borracha, adaptado de (Signes et al. 2015)

A metodologia utilizada para facilitar a análise do impacto do acréscimo de partículas de borracha, nos parâmetros não-lineares da modelação numérica, teve como base, a utilização de curvas aproximadas dos resultados laboratoriais, com K_2 constante e a variação apenas de K_1 . No gráfico da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, é possível observar as curvas aproximadas.

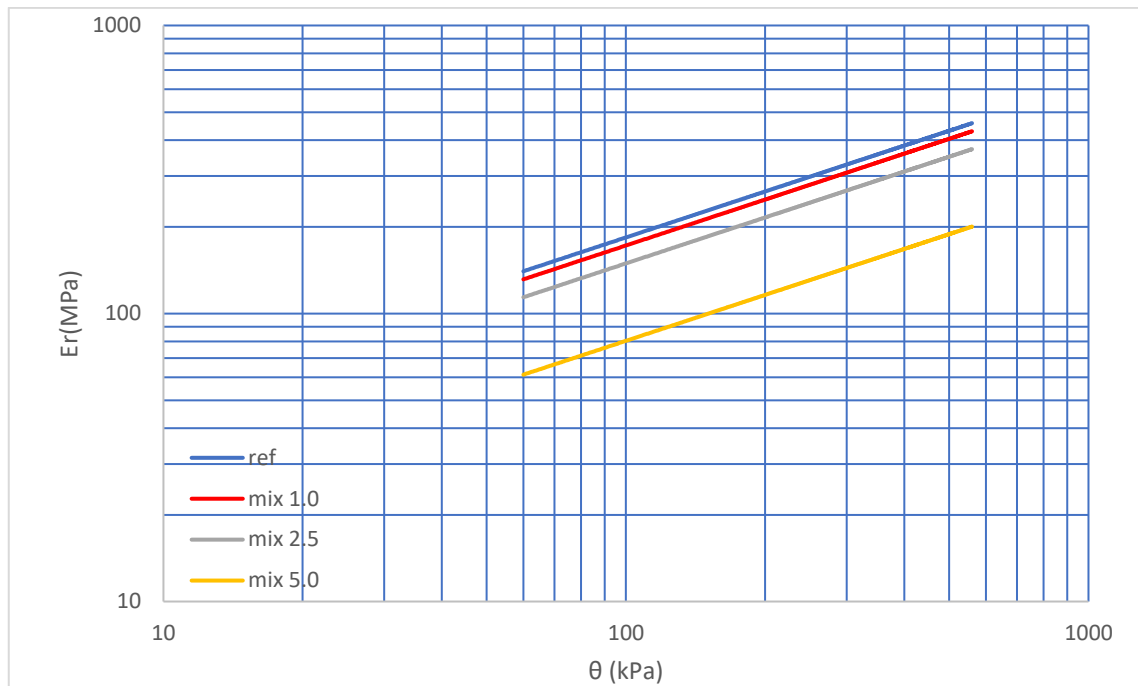


Figura 3.6 Curvas aproximadas de Módulos Resilientes às do trabalho (Signes et al. 2015)

A partir das curvas aproximadas, foi possível avaliar a redução de K_1 , com a mistura de referência sem partículas (ref) e as misturas com as respectivas percentagens de borracha, representadas na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.2 Impacto do acréscimo de borracha no parâmetro K_1 para as correspondentes misturas de borracha

Misturas	Er [MPa]; θ [kPa]		variação
	K_1'	K_2'	%
ref	16,00	0,53	-
mix 1.0	15,00	0,53	-6%
mix 2.5	13,00	0,53	-19%
mix 5.0	7,00	0,53	-56%

4. Modelação numérica tridimensional do sistema veículo-via-subestrutura

4.1. Breve enquadramento histórico

Até meados do século passado, existiam dois principais métodos para efetuar a análise estrutural de vias-férreas: por meio de modelos analíticos simples e por meio de ensaios experimentais, tanto em laboratório como *in situ*.

A evolução tecnológica originou novas e mais complexas abordagens computacionais para estudos centrados na infraestrutura ferroviária, tendo como base dois métodos principais: (MEF) método dos elementos finitos e (MDF) método das diferenças finitas. No princípio do seu desenvolvimento, estes métodos estavam limitados a modelos simplificados de estruturas, como modelos bidimensionais, devido à baixa capacidade tanto a nível de hardware como de software. No entanto, com o incremento do poder computacional, atualmente é cada vez mais frequente a utilização destes métodos para a representação tridimensional e cada vez mais complexa dos sistemas ferroviários, integrando muitas vezes também representações simplificadas do próprio veículo ferroviário.

A grande vantagem destes métodos consiste na possibilidade da implementação de análises que consideram variações físicas e geométricas do sistema, utilizando também leis constitutivas diversas e suplementares à clássica lei elástica-linear.

Complementarmente, verificaram-se progressos significativos ao nível do conhecimento do comportamento dos geomateriais, que puderam ser incorporados em modelos numéricos mais sofisticados (Fortunato 2005).

Assim, desde os estudos matemáticos pioneiros centrados em representações unidimensionais do tipo de Winkler (Timoshenko 1915; Zhai and Cai 1997; Nielsen and Oscarsson 2004) estudos

mais recentes têm sido efetuados com representações tridimensionais do sistema, principalmente usando os métodos numéricos referidos atrás (Hall 2003; Sheng, Jones, and Thompson 2006; Galvín, Romero, and Domínguez 2010; Costa et al. 2010; Fortunato 2005).

Apesar destes avanços, a consideração de aspetos de resposta não-lineares em modelos com muitos graus-de-liberdade, continua a representar uma dificuldade muito significativa. Mesmo utilizando programas de cálculo automático cada vez mais desenvolvidos, como o ABAQUS, ANSYS ou o LS DYNA, a simulação de modelos grandes em regime dinâmico com leis constitutivas não-lineares é essencialmente ainda impraticável ao nível da prática da engenharia corrente, do ponto de vista de esforço computacional e tempo de cálculo necessários com a utilização destes programas.

Os aspetos de resposta não-lineares que intervêm significativamente na resposta do sistema ferroviário são: o comportamento resiliente não-linear das camadas de apoio da ferrovia; o contacto normal não-linear roda-carril; e o contacto não-linear travessa-balastro, particularmente quando a travessa levanta e perde contacto com o balastro subjacente.

O programa *Pegasus* foi desenvolvido inicialmente na NOVA-FCT, tendo vindo a ser implementadas melhorias em resultado de estudos desenvolvidos em colaboração próxima com o LNEC. O programa permite o cálculo dinâmico de representações tridimensionais do sistema completo veículo-via-solo, considerando os aspetos não-lineares referidos acima, e permite a construção de modelos relativamente grandes com vários milhões de graus-de-liberdade, caso necessário, com tempos de cálculo computacionais perfeitamente aceitáveis. O programa admite ainda a consideração de geometrias de via não horizontais, e a consideração de irregularidades na mesa de rolamento do carril. O seu contínuo desenvolvimento tornaram-no numa das ferramentas de referência no domínio do cálculo computacional de sistemas ferroviários. Será esta a ferramenta usada na presente dissertação.

4.2. Elementos constituintes do programa utilizado

O programa *Pegasus* (J. N. Varandas 2013) tem como função simular diferentes situações da passagem de um comboio na correspondente linha férrea, através de um modelo tridimensional, exportando as grandezas necessárias para avaliar o comportamento do sistema veículo-via-substrutura do caso em estudo.

O Programa foi integralmente implementado no software Matlab (MathWorks Inc 2014). Este programa tem sido desenvolvido ao longo dos anos com o intuito de otimizar suas funções, tornando-o computacionalmente mais rápido, e expandindo a possibilidade de novos tipos de análises, incluindo, desde 2020, também o cálculo do comportamento de longo-prazo do sistema sujeito a passagens repetidas de comboios (J. Varandas et al. 2020).

Em seguida, descreve-se de forma muito sucinta as principais características e modelos considerados neste programa.

4.2.1. Composição do sistema ferroviário

O sistema ferroviário é subdividido no *Pegasus* em três subsistemas, construídos separadamente e posteriormente acoplados: sendo estes a subestrutura, a superestrutura e o veículo, respetivamente.

- **Subestrutura**

O primeiro subsistema é constituído pelas camadas de balastro, sub-balastro, coroamento e fundação, estes representados por elementos hexaédricos de 8 nós com 3 graus de liberdade, translação nas três direções, resultando no total de 24 graus de liberdade por elemento. A Figura 4.1, a seguir, representa o exemplo de elemento desta natureza, com os correspondentes nós do elemento numerados de 1 a 8 (a vermelho) e as 3 translações do nó 8, exemplificadas por u_1 , u_2 e u_3 (a azul).

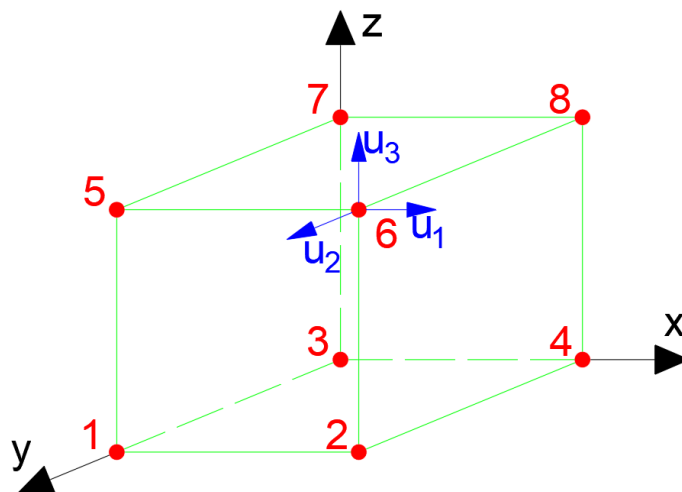


Figura 4.1 Esquema de elemento hexaédrico

- **Superestrutura**

O segundo subsistema representa as travessas e carris modelados por elementos de viga regidos pela teoria da viga de Euler-Bernoulli, apresentam 3 graus-de-liberdade de translação e 2 de rotação por nó. Apenas não foram consideradas as duas rotações de torção em cada nó. As palmilhas de carril são representadas como amortecedores e molas que conferem a rigidez e amortecimento do material utilizado. É possível observar estes elementos no esquema representativo na Figura 4.2. À semelhança dos suprarreferido elementos da subestrutura, os dois nós do elemento da superestrutura estão representados a vermelho, com os graus de liberdade do nó 2 representados a azul, sendo u_1 , u_2 e u_3 translações; θ_1 e θ_2 rotações.

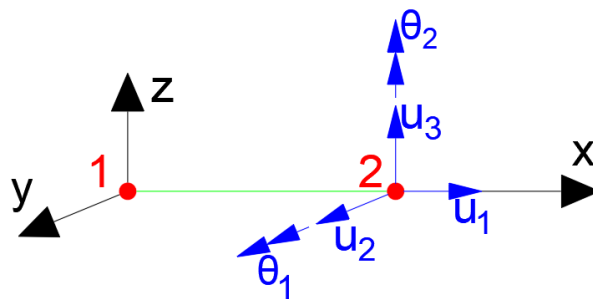


Figura 4.2 Representação de elementos de viga rígidos

- **Veículo**

O Terceiro subsistema é constituído pelo veículo. Representado pela interligação de corpos rígidos através de molas e amortecedores, do correspondente bogie, elemento constituinte dos comboios, com a função de suportar suas componentes rodas, eixos, suspensão e, com a possibilidade dos motores de tração para o caso dos transportes motorizados.

A Figura 4.3, corresponde à duas vistas (longitudinal e transversal) do esquema de um bogie, com seus respetivos graus de liberdade. Este tipo de elemento contém 8 graus de liberdade (4 translações e 4 rotações) por bogie.

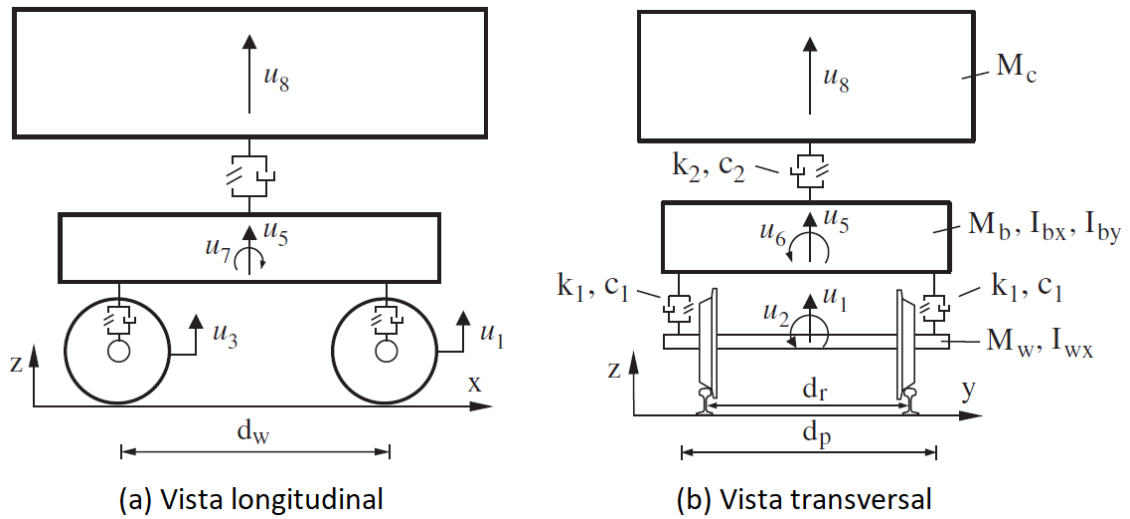


Figura 4.3 Representação do bogie do veículo do modelo, adaptado de (J. N. Varandas, Paixão, and Fortunato 2017)

Os graus de liberdade u_1 , u_3 , u_5 e u_8 representam as translações no sentido vertical do eixo dianteiro, eixo traseiro, bogie e caixa do veículo, respetivamente. Enquanto u_2 , u_4 , u_6 e u_7 são rotações, sendo os três primeiros no plano yz e o último em xz , de forma respetiva correspondentes ao eixo dianteiro, eixo traseiro e os dois últimos ao bogie.

Os parâmetros M (massas), I (Inércias) dos correspondentes elementos, contém os índices w , b , c , representando os eixos, bogie e caixa do veículo, respetivamente. Para representar os amortecedores entre eixos e bogie foram implementadas molas e amortecedores, em correspondência com os parâmetros k e c com o índice referente ao respetivo eixo. As distâncias d contém os índices w , r e p respetivamente referentes ao intervalo entre eixos, carril e amortecedores dos respetivos eixos.

4.2.2. Interação entre subsistemas

Estes subsistemas estão interligados por forças de interação, como mostra a Figura 4.4. As forças de interação entre as travessas e a superfície da camada de balastro apresentam dois tipos de efeitos, contato vertical entre base da travessa e balastro, e atrito entre as faces laterais das travessas e o balastro confinado.

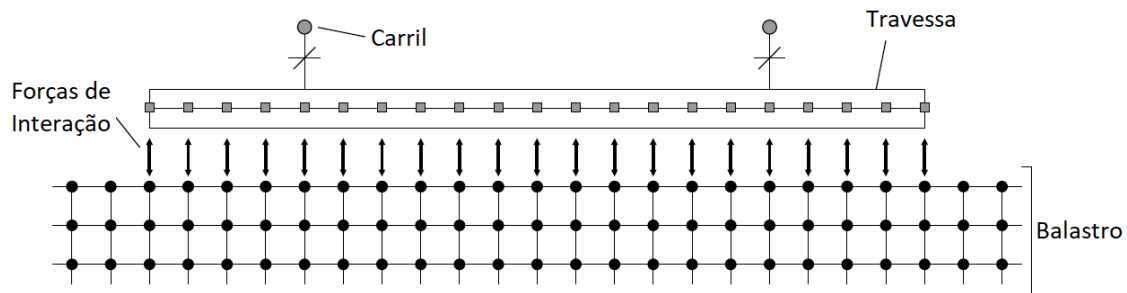


Figura 4.4 Forças de interação entre travessa e superfície da camada de balastro, adaptado de (J. N. Varandas 2013)

A solução do problema está subdividida em quatro etapas de cálculo, englobadas em três sistemas, como descrito no esquema representado na Figura 4.5.

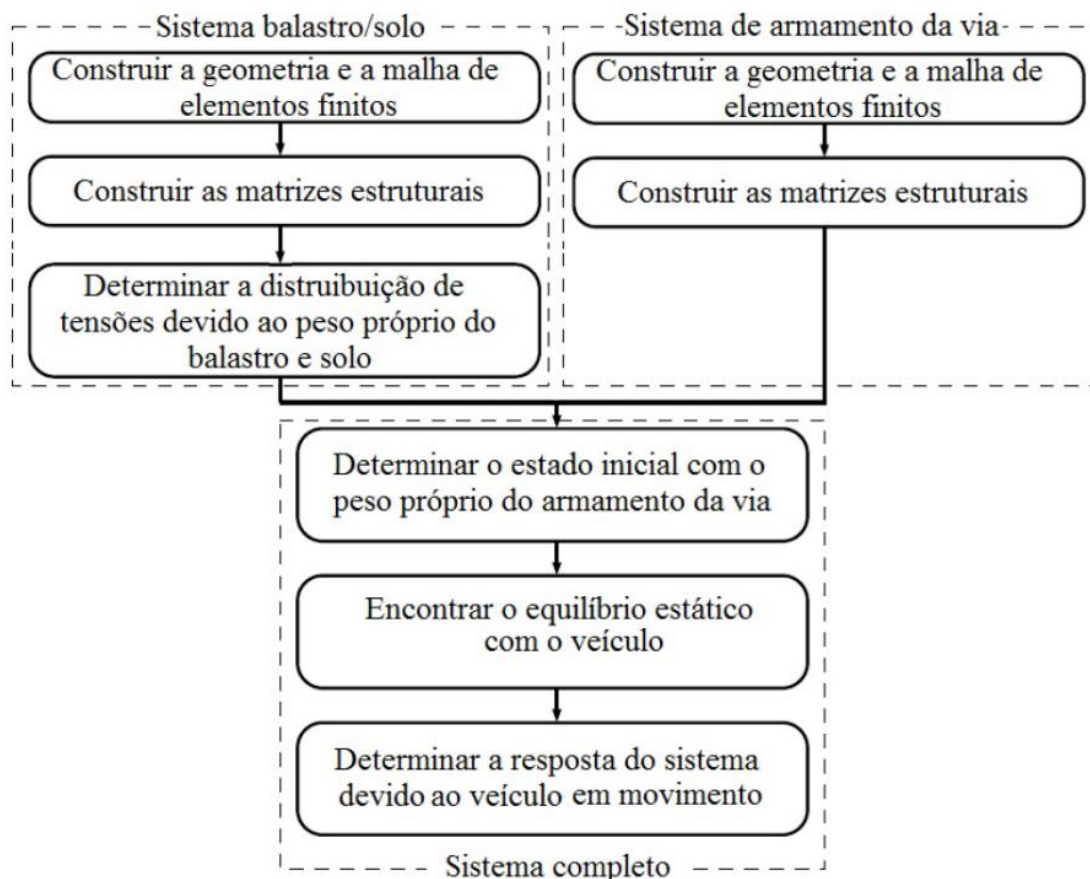


Figura 4.5 Esquema das etapas de cálculo do programa *Pegasus*, adaptado de (J. N. Varandas 2013)

A primeira fase considera apenas o sistema da subestrutura **balastro/solo**, corresponde à elaboração da geometria e das propriedades dos materiais que compõe a subestrutura. A primeira etapa nomeada por **peso do solo** tem a função de determinar o equilíbrio das tensões, exercida pelos seus respetivos pesos próprios.

Na segunda fase, o **armamento da via** corresponde ao segundo sistema do modelo. A semelhança da primeira, refere-se à estruturação das propriedades e geometrias dos elementos compostos pela superestrutura.

O terceiro sistema **completo**, resulta na solução final do problema. Este sistema é composto por três etapas de cálculo. O **peso da via**, segunda etapa. Determina o estado de equilíbrio com as forças de interação travessa/balastro com a aplicação do peso próprio da via. Posteriormente, na terceira etapa, **peso do comboio**, correspondente ao equilíbrio estático com as forças de interação comboio/carril, a partir do peso próprio do veículo, situado na secção inicial, como mostra a Figura 4.6. Por fim, a última etapa denominada como **comboio em movimento**, contém a função de determinar a resposta dinâmica após a passagem do veículo modelado, através da secção de estudo, zona mais refinada.

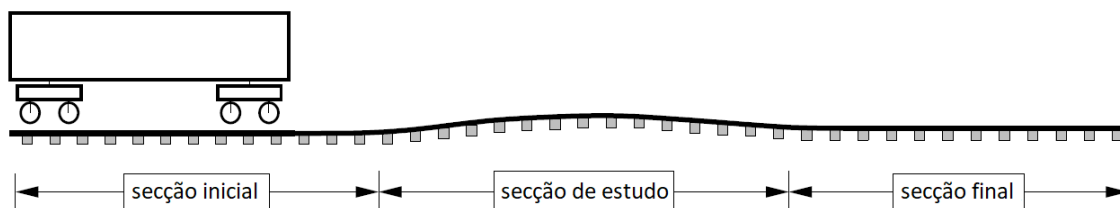


Figura 4.6 Esquema exemplificativo das secções do programa *Pegasus*, adaptado de (J. N. Varandas 2013)

Para ilustrar o processo construtivo do programa *Pegasus*, foi elaborado um modelo exemplo, do qual mediu-se os deslocamentos verticais ao longo do tempo, no balastro abaixo da travessa central da secção de estudo. O gráfico da Figura 4.7 corresponde a esta análise, representando todas as etapas descritas acima. É possível observar que ao formular este exemplo, teve-se o cuidado de obter a duração necessária de cada etapa de cálculo para haver a estabilização dos deslocamentos para a etapa seguinte.

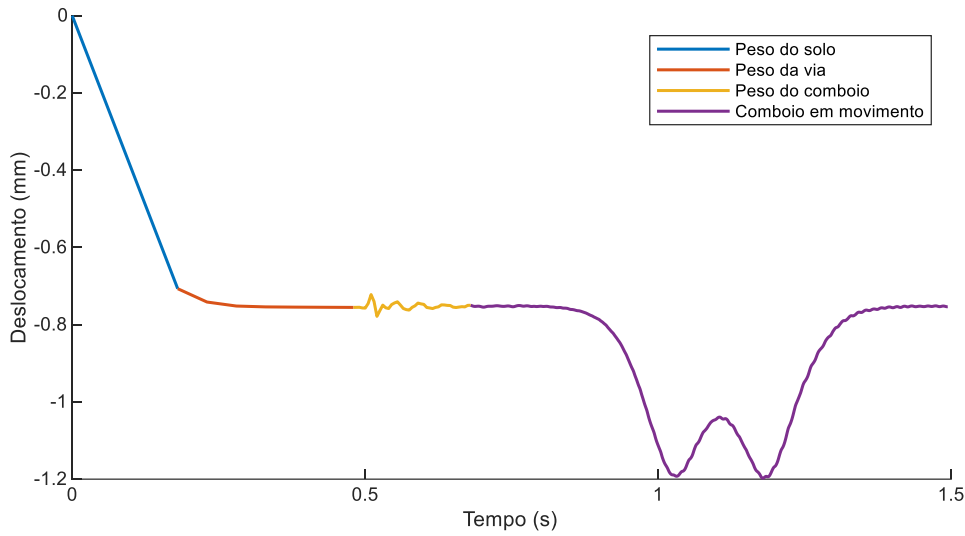


Figura 4.7 Deslocamento obtidos no balastro ao longo das etapas de cálculos no tempo

4.3. Equações que regem o modelo numérico

O método utilizado para a discretização espacial do problema é o Método dos Elementos Finitos. Este método assenta na subdivisão do domínio espacial contínuo em elementos de dimensão relativamente pequena, onde as incógnitas de deslocamentos se restringem aos deslocamentos pontuais nos nós do modelo. A simplificação subjacente assenta no pressuposto que a dimensão e número de elementos finitos considerados para representar o protótipo em estudo são adequados e suficientes para que o erro decorrente da aproximação seja desprezável (J. N. Varandas 2013).

As Equações utilizadas pelo modelo são caracterizadas por:

$$\begin{cases} K_v u_v + C_v v_v + M_v a_v = f_{g.v} + f_{a.w} \\ K_t u_t + C_t v_t + M_t a_t = f_{g.t} - f_{a.w} + f_{a.b} \\ K_s u_s + C_s v_s + M_s a_s = f_{g.s} - f_{a.b} \end{cases} \quad (4.1)$$

Sendo as matrizes K , C e M de rigidez amortecimento e massa respetivamente. Os vetores, u , v e a correspondem de forma respetiva aos deslocamentos, velocidades e aceleração. Os índices v , t e s representam os subsistemas veículo, superestrutura e subestrutura, em sequência.

Do outro lado da igualdade os vetores de forças f_g , $f_{a.w}$ e $f_{a.b}$ ordenadas por gravíticas, interação veículo-via e interação travessa-balastro.

4.3.1. Método de integração das equações diferenciais

A solução das equações diferenciais de equilíbrio, como a equação (4.1), é obtida através de métodos de integração no tempo passo-a-passo. Os métodos numéricos passo-a-passo para integração das equações diferenciais, são normalmente divididos nos métodos implícito e explícitos.

Os métodos implícitos geralmente permitem maiores passos de tempo, embora o tempo necessário aumente substancialmente, com a grande quantidade de graus de liberdade introduzidas no modelo, devido ao elevado número de equações para resolver em simultâneo.

Métodos explícitos, por outro lado, requerem de passos de tempo muito menores, mas não necessitam da inversão da matriz de rigidez, sendo basicamente formados por operações simples matriciais algébricas, desde que a matriz de massa permaneça diagonal.

A escolha adequada do integrador de tempo depende, das características do modelo numérico. No caso do *Pegasus*, a separação do sistema em 3 subsistemas independentes, embora acoplados, como observável na equação (4.1), oferece a possibilidade de selecionar diretamente o tipo de integrador de tempo mais adequado para cada subsistema, com a grande mais-valia da diminuição do esforço computacional, sem a redução da precisão dos resultados obtidos.

No *Pegasus* a superestrutura é tratada com um integrador de tempo implícito, o método de Newmark, enquanto a subestrutura é tratada com um integrador explícito (Zhai 1996), de forma a promover a otimização do tempo de cálculo.

4.3.2. Opções de elasticidade da subestrutura

Para representar o comportamento resiliente dos materiais da subestrutura, no *Pegasus*, podem ser adotadas duas opções, o modelo linear elástico da Lei de Hooke e o modelo elástico não linear K- θ .

- Lei de Hooke

A opção linear elástica, Lei de Hooke isotrópica 3D em coordenadas Cartesianas, é regida pela seguinte equação:

$$\sigma = \mathbf{D}\varepsilon \quad (4.2)$$

onde σ e ε correspondem à forma vetorial dos tensores das tensões e extensões, respetivamente, representados a seguir:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

\mathbf{D} representa a matriz de rigidez constitutiva, tradicionalmente escrita em função do módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν), como mostra a equação:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

- Modelo K- θ

A segunda opção, modelo elástico não-linear K- θ (Brown and Pell 1967; Hicks 1970; Hicks and Monismith 1972), um dos modelos que melhor se aproxima do comportamento de materiais granulares, foi desenvolvido para descrever os resultados do ensaio triaxial com pressão de confinamento constante, determinando o Módulo Resiliente (Er), substituindo o módulo de Young (E) na matriz \mathbf{D} , com aumento não linear de acordo com o somatório da tensão normal do material, a partir da simples relação hiperbólica, regida pela equação:

$$Er = K_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad (4.5)$$

Sendo θ o primeiro invariante de tensão (somatório das tensões principais), definidas como positivas quando em compressão, θ_0 é uma tensão de referência normalmente considerada 100 kPa, K_1 e K_2 são parâmetros de calibração de cada material.

A relação $Er - \theta$, representada na Figura 4.8, está estendida ao estado de tensão de tração, admitindo o módulo resiliente constante até o correspondente valor mínimo E_{min} , determinado pelo menor valor de tensão aceitável (Allaart 1992).

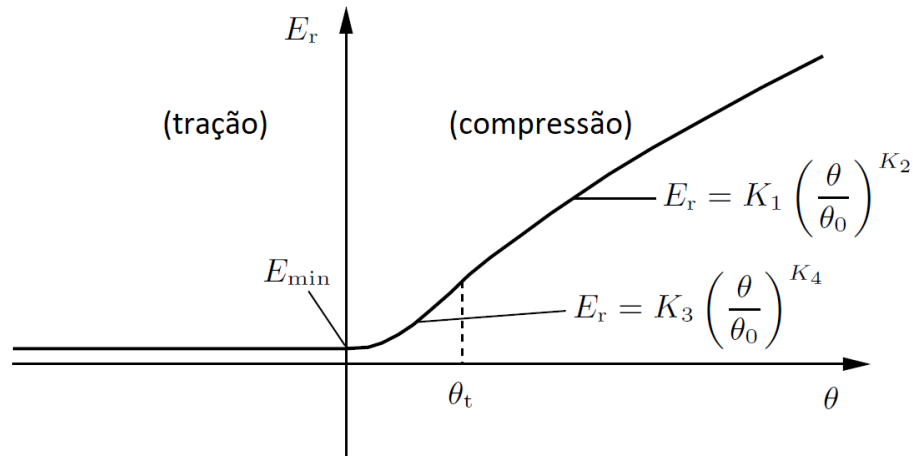


Figura 4.8 Relação $Er - \theta$, adaptado de (J. N. Varandas 2013)

A equação matemática que rege a relação $Er - \theta$, está representada a seguir:

$$E_r(\theta) = \begin{cases} E_{min}, & \text{se } \theta < 0 \\ E_{min} + K_3 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_4}, & \text{se } 0 \leq \theta < \theta_t \\ K_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2}, & \text{se } \theta \geq \theta_t \end{cases} \quad (4.6)$$

Na secção entre os valores de tensões 0 e θ_t , é definida pela curva de transição entre o instante da secção constante e a definida pelo valor de tensões regidos pela equação, suprarreferida K- θ . Esta curva de transição é definida pelos parâmetros K_3 e K_4 , calculados a partir dos valores de K_1 , K_2 e E_{min} predefinidos, assumindo um valor consideravelmente pequeno de θ_t , devendo cumprir com o seguinte pré-requisito:

$$K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0} \right)^{K_2} > E_{min} \quad (4.7)$$

Os valores assumidos para os parâmetros K_3 e K_4 , são definidos a partir das correspondentes equações:

$$K_3 = \frac{K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0} \right)^{K_2} - E_{min}}{K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0} \right)^{K_4}} \quad (4.8)$$

$$K_4 = \frac{K_1 K_2 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0} \right)^{K_2}}{K_1 \left(\frac{\theta_t}{\theta_0} \right)^{K_2} - E_{min}} \quad (4.9)$$

4.3.3. Amortecimento de Rayleigh

A teoria de amortecimento de Rayleigh foi incorporada para a determinação das matrizes de amortecimento da superestrutura (C_t) e da subestrutura (C_s), representadas anteriormente na equação (4.1). A equação que rege este método de representação do amortecimento, está representada a seguir:

$$C_t = a_0 M_t + a_1 (K_t + K_{sp}) \quad (4.10)$$

Onde K_{sp} corresponde a rigidez de suporte sob as travessas. Os parâmetros a_0 e a_1 são determinados de acordo com:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Onde ξ é o fator de amortecimento selecionado para as duas frequências radiais ω_1 e ω_2 .

4.3.4. Condições de fronteira

O *Pegasus* dispõe da simplificação nas fronteiras dos sistemas (Lysmer and Kuhlemeyer 1969). Esta simplificação, consiste na colocação de molas e amortecedores viscoelásticos nas fronteiras do modelo que absorvem as ondas dinâmicas, que deveriam propagar-se para os elementos não materializados, reduzindo consideravelmente as ondas refletidas nos bordos.

A última camada, normalmente representada pela fundação, pode ser substituída por uma camada do mesmo material. Simulando a espessura a acrescentar com rigidezes e amortecimentos equivalentes, reduzindo consideravelmente, o número de elementos do sistema, como ilustrado no esquema da Figura 4.9. Desta forma obtém-se o tempo de cálculo mais otimizado.

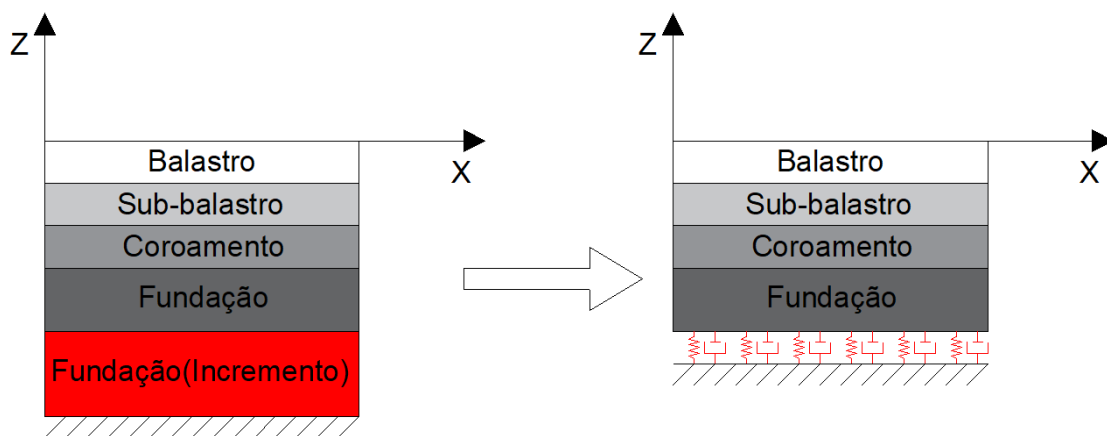


Figura 4.9 Esquema do incremento de espessura de camada por molas e amortecedores, adaptado de (J. N. Varandas 2013)

5. Estudos preliminares e calibração do modelo numérico

5.1. Enquadramento

Para calibração do modelo em relação aos efeitos dinâmicos, originados no processo da passagem de veículos ferroviários, foi efetuada a comparação entre os resultados de medições *in situ* e a modelação numérica, feita com o programa *Pegasus*.

Estas medições de campo foram efetuadas pela Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade nova de lisboa (FCT-UNL), em parceria com a Rede Ferroviária Nacional (REFER), ao abrigo do projeto SMARTRACK, entre os anos 2012 e 2013. As medições foram efetuadas para avaliar os efeitos gerados pelo desgaste ondulatório em termos de vibrações transmitidas para a envolvente (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013).

Devido à complexidade do sinal medido nas zonas com desgaste ondulatório, optou-se por calibrar o modelo apenas com base nos sinais registados numa secção contígua, mas sem desgaste ondulatório.

O comboio selecionado para a calibração do modelo foi o UQE2300, que será descrito mais abaixo, por apresentar elevada gama de resultados, em comparação aos demais veículos ferroviários analisados durante o ensaio.

A calibração dos parâmetros do modelo para aproximação dos resultados do *Pegasus* aos registos de campo foi efetuada com base num processo iterativo, originado de um estudo preliminar.

5.2. Modelação do *Pegasus*

Os estudos preliminares do presente capítulo têm como base a variação de parâmetros que apresentam maior incerteza. Os parâmetros relativos aos componentes da superestrutura apresentaram menor incerteza e, por esse motivo, foram mantidos constantes ao longo de todos modelos gerados no presente documento conforme estão apresentados na Tabela 5.1. Relativamente à subestrutura, alguns parâmetros também foram mantidos constantes, como apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.1 Propriedades mecânicas constantes para calibração dos elementos da superestrutura (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013)

Parâmetro	Notação	Valor
Dados do carril		
Módulo de elasticidade (GPa)	E,s	210
Massa volúmica (t/m ³)	ρ ,s	7,86
Dados da travessa		
Módulo de elasticidade (GPa)	E,w	30
Massa (kg)	M,w	315
Dados das palmilhas de carril		
Massa (kg)	M,rp	1
Rigidez na direção x (kN/m)	Kx,rp	65×10^3
Rigidez na direção y (kN/m)	Ky,rp	65×10^3
Amortecimento na direção x (kN.s/m)	Cx,rp	15
Amortecimento na direção y (kN.s/m)	Cy,rp	15
Amortecimento na direção z (kN.s/m)	Cz,rp	20

Tabela 5.2 Propriedades mecânicas constantes para calibração das camadas da subestrutura (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013)

Camada	Coefficiente de Poisson ν	Amortecimento ξ (%)	Massa volúmica ρ (t/m ³)
Balastro	0,2	3	1,8
Sub-balastro	0,3	3	2,0
Coroamento	0,3	3	1,8
Fundação	0,3	3	1,8

5.2.1. Definição da geometria

Nesta secção são apresentadas imagens relativas à geometria da subestrutura que foram geradas recorrendo ao programa ParaView (Ahrens, Geveci, and Law 2005), após exportação dos dados para o efeito pelo programa *Pegasus*.

A geometria utilizada para os modelos está representada na Figura 5.1, em perspetiva. Nesta vista é possível identificar as distintas secções do modelo, no sentido longitudinal. As duas secções menos refinadas denominadas como inicial e final, situam-se nas extremidades do modelo. Entre estas secções localiza-se a secção de estudo, com a malha de elementos mais refinada. A escolha das dimensões dos elementos do modelo, foram adotadas para se obter um compromisso relativo ao nível de detalhe e à extensão da representação do problema, sem aumentar exageradamente o esforço e o tempo de cálculo.

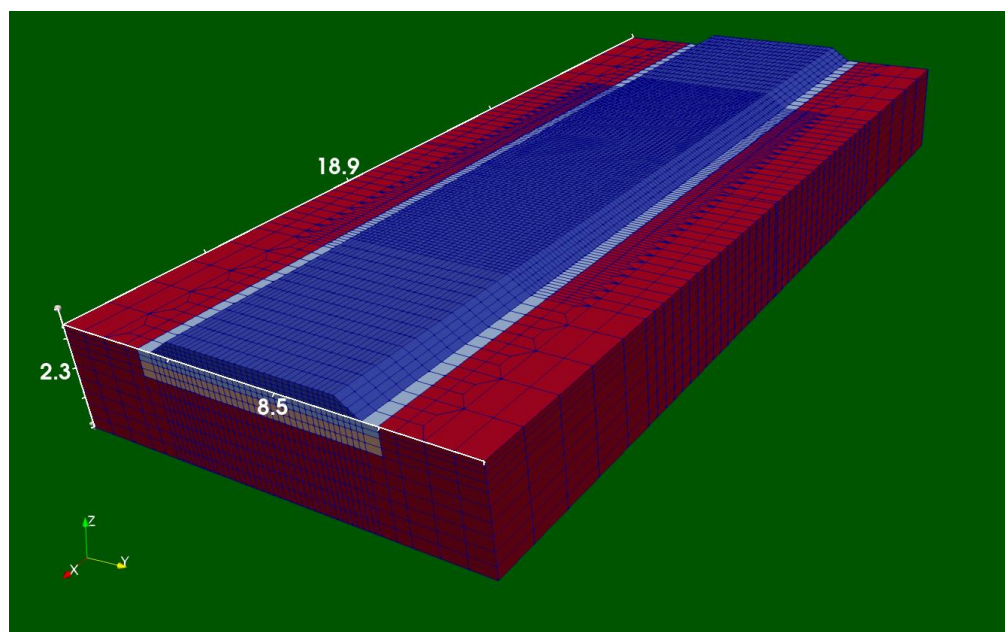


Figura 5.1 Perspetiva da geometria do modelo adotada para a calibração

No sentido transversal, a distância da bitola foi subdividida em 14 elementos de 12 cm cada, totalizando 1,68 m. Esta componente geométrica foi modelada de forma a se aproximar da bitola ibérica da linha férrea onde foram efetuados os ensaios, correspondente a 1,668 metros. As travessas foram modeladas com 2,6 m de comprimento. O comprimento transversal total do modelo é de 8,5 m, como se pode observar na Figura 5.2

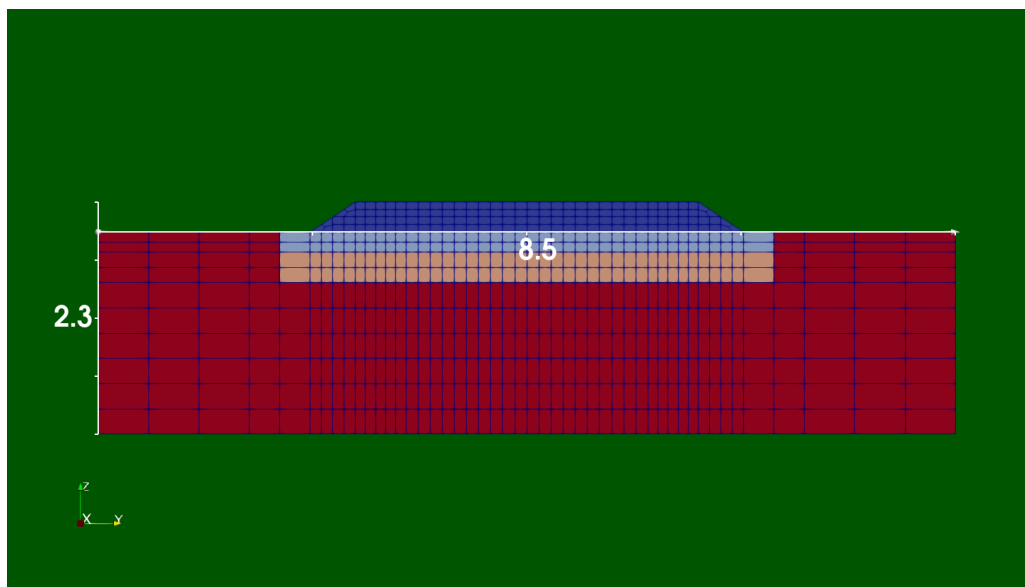


Figura 5.2 Vista transversal da geometria do modelo adotada para a calibração

No sentido longitudinal o modelo dispõe no total de 31 travessas, espaçadas de 60 cm entre elas somando 18,9 m. As travessas estão distribuídas entre as três seções do modelo: 7 nas seções inicial e final (sentido longitudinal); e 17 na seção de estudo, como mostra a Figura 5.3

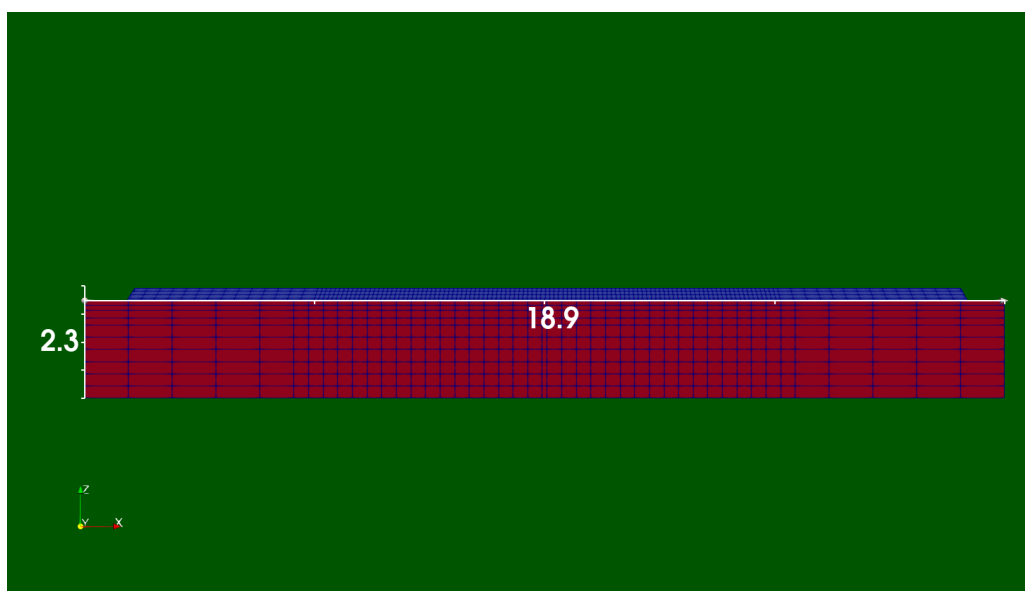


Figura 5.3 Vista longitudinal da geometria do modelo adotada para a calibração

As camadas da subestrutura, com suas respectivas espessuras em profundidade e cores, estão representadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Espessuras das camadas da subestrutura consideradas para calibração do modelo

Camada	Espessura(cm)	Cor
Balastro	30	Azul
Sub-balastro	20	Cinzentos
Coroamento	30	Laranja
Fundação (abaixo do coroamento)	200	Vermelho
Fundação (laterais do modelo)	250	Vermelho

5.2.2. Modelo do veículo

De acordo com (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013) os comboios U.Q.E são unidades de transporte de passageiros habitualmente usados nos serviços urbanos e suburbanos. Compostas por 4 carruagens, (ordenadas por: motora + reboque + reboque + motora).

Como referido anteriormente, o veículo utilizado para calibração do *Pegasus*, foi o UQE da série 2300 por apresentar maior número de resultados representativos dos ensaios de campo realizados no âmbito de trabalhos anteriores (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013).

Os parâmetros utilizados para a modelação do comboio no *Pegasus* do UQE2300, têm como base a informação consultada em (Trainlogistic 2020; ADtranz 2000) com vista a realizar as simulações da passagem apenas do primeiro bogie da unidade motora.

A velocidade do veículo considerada para a simulação foi de 60km/h, que corresponde ao valor médio das velocidades de circulação deste tipo de veículo, observados na localização selecionada aquando da realização dos ensaios *in-situ*.

O esquema da Figura 5.4 refere-se as medidas longitudinais da primeira carruagem (unidade motora) do UQE2300, onde encontra-se destacada a zona do primeiro bogie, com a distância entre eixos de 2,6 metros que foi considerada na modelação do veículo.

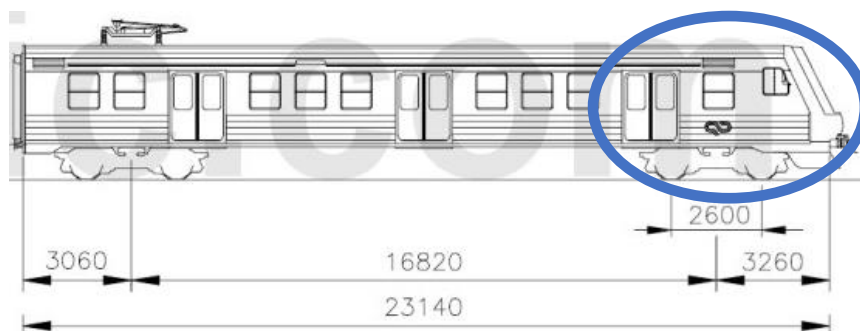


Figura 5.4 Distâncias longitudinais da carruagem motora do veículo modelado, adaptado de (Trainlogistic 2020)

A Tabela 5.4 refere-se aos parâmetros dos corpos rígidos utilizados para a modelação do veículo, sendo I_{xx} e I_{yy} as inércias nos referenciais locais. Os parâmetros apresentados na Tabela 5.5 correspondem aos elementos de suspensão do bogie.

Tabela 5.4 Parâmetros dos corpos rígidos do bogie modelada para calibração do modelo (ADtranz 2000)

Corpo Rígido	Massa (kg)	Momentos de Inércia (kg.m ²)	
		I_{xx}	I_{yy}
Rodado do Bogie	1 800	709	709
Bogie	7 300	86,7	-
Caixa do veículo com carga mínima	33 000	-	-
Caixa do veículo com carga máxima	49 380	-	-

Tabela 5.5 Parâmetros dos elementos de suspensão do bogie modelada para calibração do modelo (ADtranz 2000)

Elemento	Rigidez (kN/m)	Amortecimento (kN.s/m)
Suspensão primária	1100	14
Suspensão secundária	1100	14

5.3. Estudos preliminares

Para avaliar a influência de alguns parâmetros dos modelos foram realizados estudos paramétricos utilizando o programa *Pegasus*.

Os subcapítulos (5.3.1) e (5.3.2) referem-se a modelos nos quais se considerou o comportamento linear elástico do material da camada de balastro. Em ambos os casos, o ponto de análise de comparação dos resultados experimentais com os numéricos é a extremidade da travessa central do modelo, no sentido transversal da via. As comparações realizadas referem-se à resposta transiente do modelo em termos de deslocamentos à passagem do veículo.

No subcapítulo (5.3.3) introduz-se o comportamento não-linear do material da camada de balastro e avalia-se a sua influência. A comparação com os resultados experimentais é realizada no mesmo ponto de análise e também à resposta transiente do modelo em termos de deslocamentos à passagem do veículo.

No subcapítulo (5.3.4), são avaliadas as diferenças entre os modelos de comportamento linear e não-lineares da camada de balastro, a nível do estado de tensão, ao longo do tempo.

5.3.1. Carga do veículo

Para avaliar o efeito da alteração da massa do veículo na resposta do sistema, optou-se pela comparação entre o comboio com cargas mínimas (sem passageiros) e máximas (quando o limite de lotação é atingido), com suas massas da caixa do veículo nas supracitadas Tabela 5.4 e Tabela 5.5.

A Figura 5.5, representa o impacto da variação das cargas do UQE2300, nos deslocamentos, ao longo do tempo, onde observamos que os deslocamentos aumentam com as cargas máximas, em comparação com as cargas mínimas.

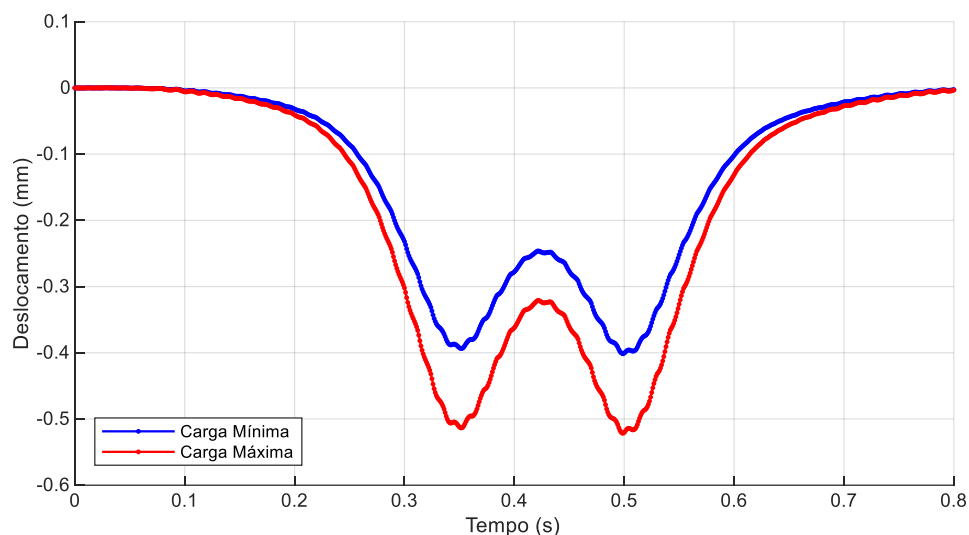


Figura 5.5 Comparação entre as cargas máximas e mínimas nos deslocamentos, ao longo do tempo

5.3.2. Parâmetros mecânicos da subestrutura

Os modelos utilizados para estas análises, foram dimensionados com a passagem do UQE2300 (carga mínima). As variáveis utilizadas para o processo iterativo foram: os módulos de elasticidade das camadas de balastro, sub-balastro, coroamento e fundação; as rigidezes (direção z) das palmilhas de carril; a substituição de espessura da fundação, abaixo do modelo.

Os estudos foram originados da comparação entre modelos, a partir da variação dos parâmetros mecânicos de um modelo base.

O modelo base é composto pelos seguintes parâmetros: módulos de elasticidade de 130 MPa para os elementos compostos por balastro, estes com menor variação por ser um material com maior certeza de sua composição; 200 MPa para as restantes camadas da subestrutura; 200 kN/mm de rigidez das palmilhas de carril; 4,5 m de espessura substituída da fundação. Nos gráficos correspondentes a este estudo, o modelo base está identificado pela cor azul.

- Camada de balastro

No caso da camada de balastro, o aumento do módulo de elasticidade diminui os deslocamentos em todo instante da passagem do bogie do comboio simulado. Este comportamento é mais evidente nos instantes de contato das rodas do veículo no perfil do carril sobre a correspondente travessa em análise (aproximadamente 3,5 e 0,5 s), como ilustrado no gráfico da Figura 5.6.

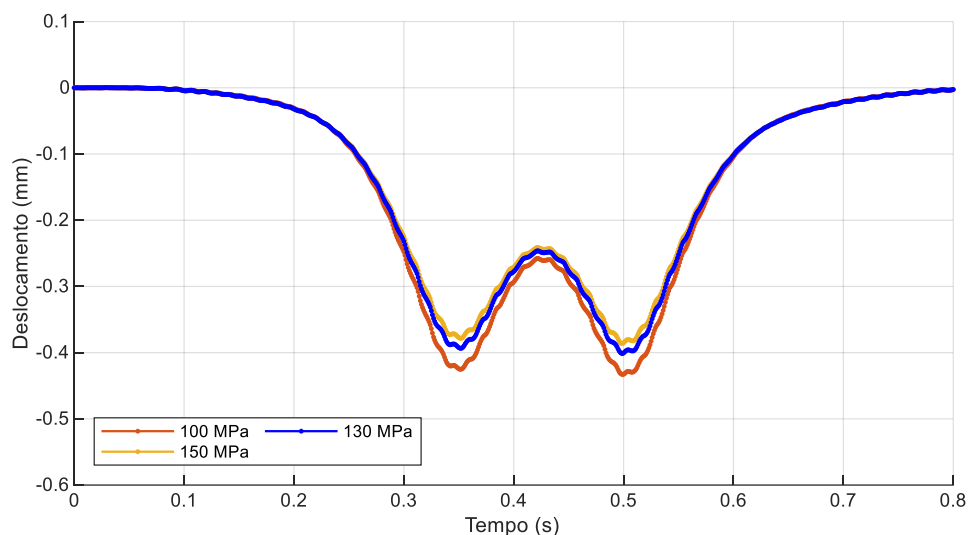


Figura 5.6 Avaliação da variação do módulo de elasticidade da camada de balastro nos deslocamentos, ao longo do tempo

- Camada de sub-balastro

O aumento do módulo de elasticidade do material granular da camada de sub-balastro, reduz os deslocamentos e velocidades de forma semelhante à camada de balastro. O diferencial desta variação nesta camada corresponde a forma mais uniforme e com menor magnitude das reduções ao longo do tempo (entre o intervalo dos 0,3 e 0,5 s), como mostra a Figura 5.7.

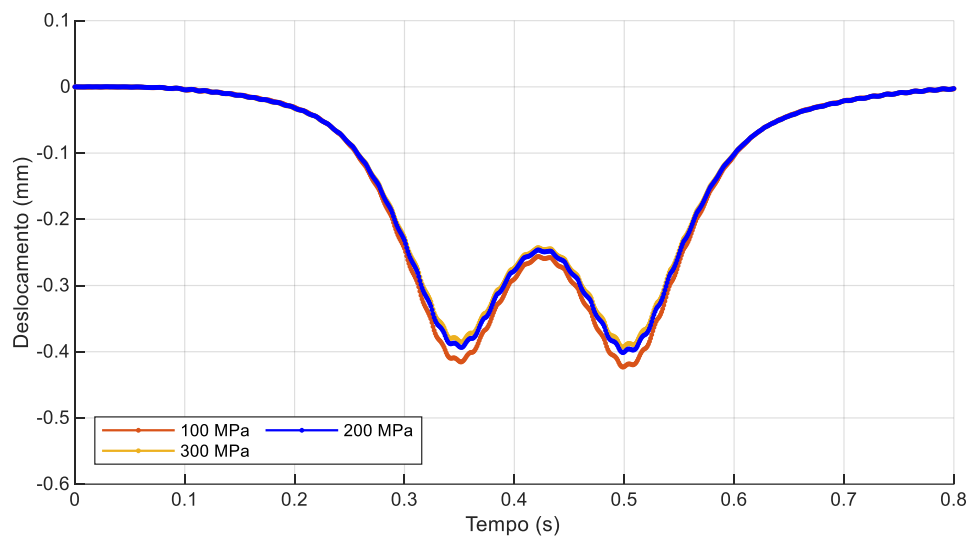


Figura 5.7 Avaliação da variação do módulo de elasticidade da camada de sub-balastro nos deslocamentos, ao longo do tempo

- Camada de coroamento

Esta camada, sendo aproximadamente de mesma espessura, neste caso, que a camada de sub-balastro, e situada sob esta, tem a influência da variação dos módulos de elasticidade, de seus correspondentes elementos, com impactos à semelhança de sua camada superior, como se observa na Figura 5.8.

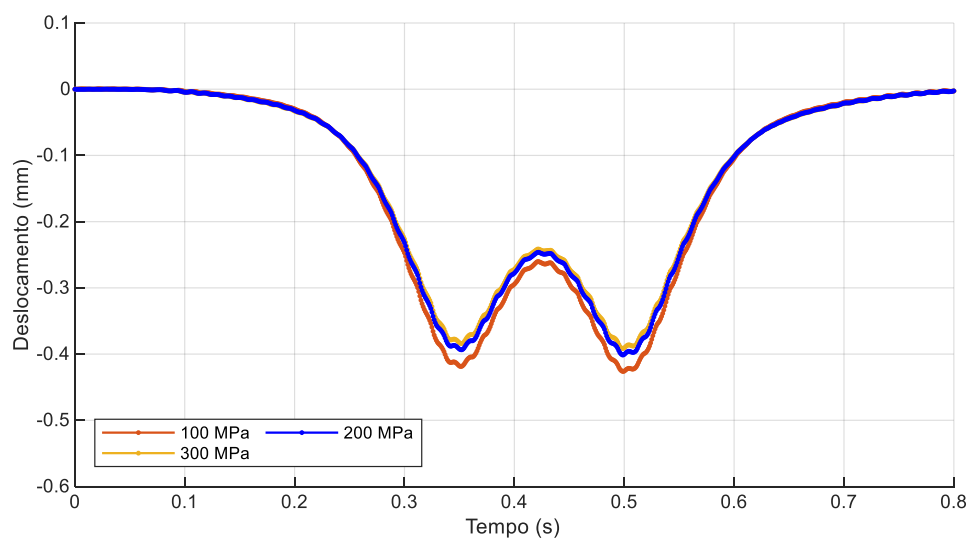


Figura 5.8 Avaliação da variação do módulo de elasticidade da camada de coroamento nos deslocamentos, ao longo do tempo

- Camada de fundação

Ao avaliar os resultados obtidos nas camadas da subestrutura, é possível concluir que nos casos da variação das camadas mais a montante do sistema, os deslocamentos não têm as variações evidentes, se comparados com a variação da camada de fundação, como se pode observar na Figura 5.9.

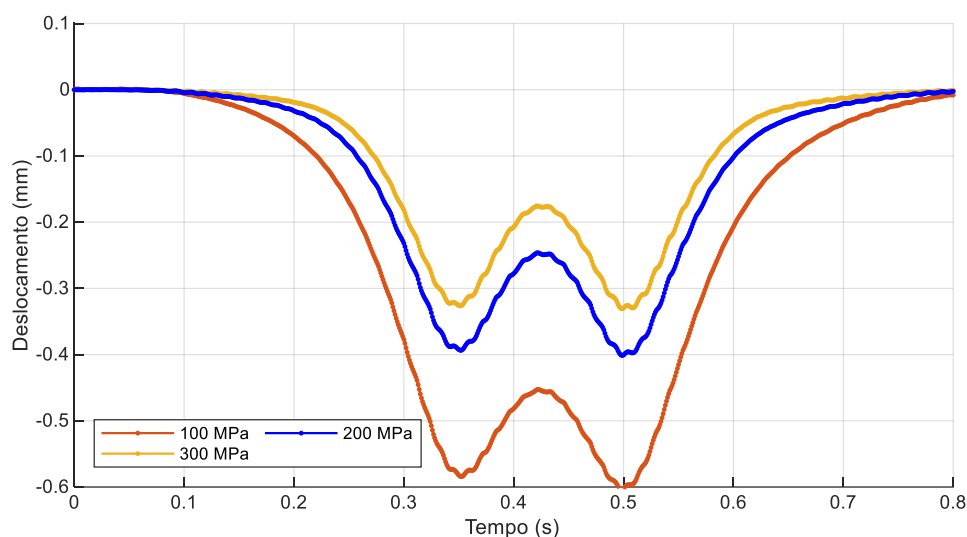


Figura 5.9 Avaliação da variação do módulo de elasticidade da camada de fundação nos deslocamentos, ao longo do tempo

Ao aumentar o módulo de elasticidade da fundação, os deslocamentos começam a diminuir antes e terminam depois (no intervalo entre 0,1 e 0,8 s) e com maior magnitude, em comparação com as demais camadas (no intervalo entre 0,3 e 0,6 s).

Este fator ocorre devido à dimensão da espessura das camadas, no caso da fundação está na ordem de grandeza dos decímetros, enquanto nas demais camadas nos centímetros.

- Palmilhas de carril

O aumento da rigidez das palmilhas de carril (na direção z) pode provocar o desgaste prematuro dos componentes do material circulante e da infraestrutura. Quanto maior seu valor, menor a sua função principal de atenuação de vibrações.

Este aumento resulta em maiores deslocamentos nos instantes coincidentes ao contato dos rodados do veículo no carril, na correspondente travessa em análise. Também na diminuição dos deslocamentos no momento em que travessa se situa entre as rodas dianteiras e frontais do bogie, como se pode observar na Figura 5.10.

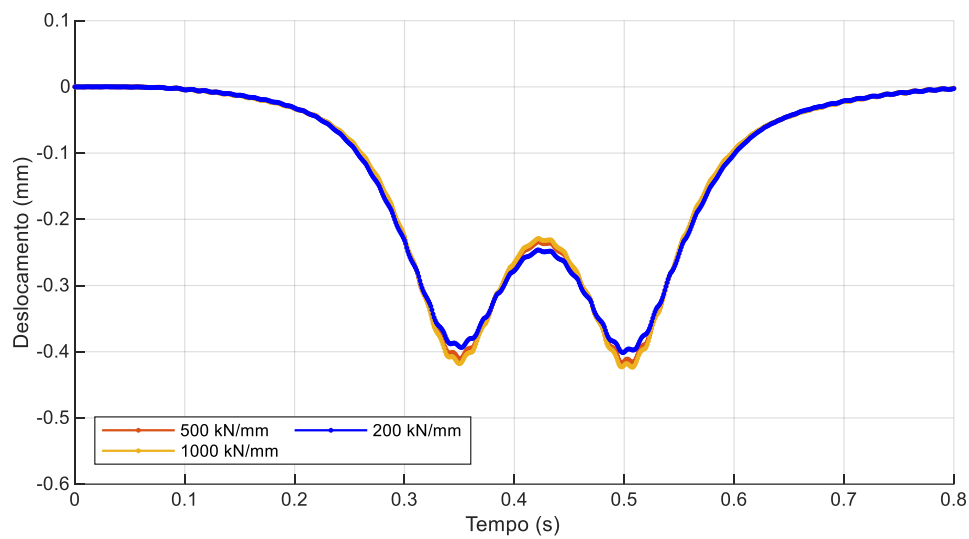


Figura 5.10 Avaliação da variação da rigidez das palmilhas de carril nos deslocamentos, ao longo do tempo

- Camada de fundação substituída

A substituição de espessura da camada de fundação, por meio de molas com rigidezes e amortecimentos, está apresentado com maior detalhe no subcapítulo (4.3.4).

A influência da diminuição da substituição desta camada diminui os deslocamentos de forma aproximadamente constante, ao comparar com a influência da variação dos parâmetros já referidos, no período entre a aproximação e passagem do bogie do veículo, como se observar na Figura 5.11.

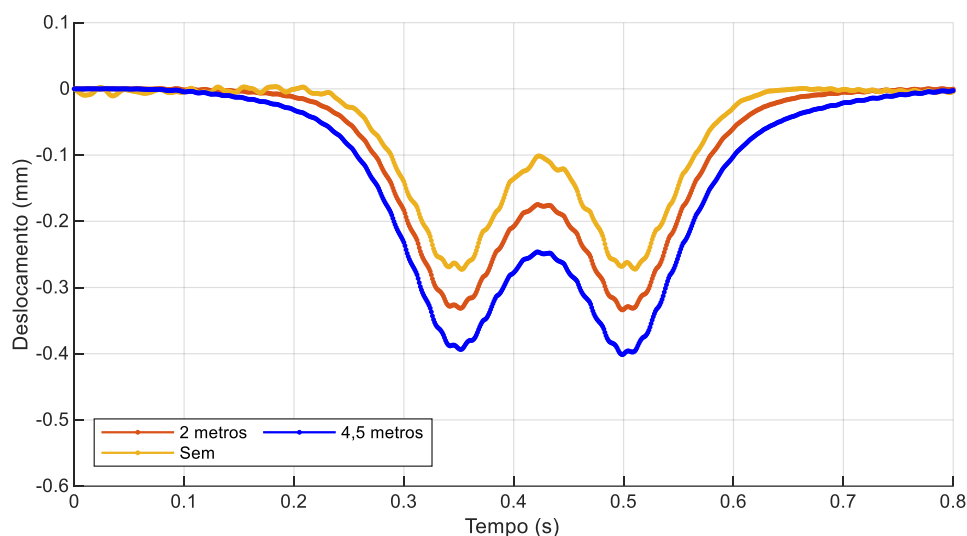


Figura 5.11 Avaliação da variação da espessura da fundação substituída, nos deslocamentos ao longo do tempo

Para diminuição da complexidade das análises efetuadas, o tempo de equilíbrio do modelo de acordo com a etapa de cálculo, manteve-se constante entre modelos. Desta forma observou-se que a diminuição da espessura substituída da última camada pode gerar a instabilização do modelo, como se pode observar na imagem Figura 5.11, caso sem espessura.

Tendo em vista a influência deste fator, houve a necessidade do aumento do tempo da etapa de equilíbrio de massas do modelo. Para os modelos numéricos utilizados na sequência da dissertação, variou-se os tempos de equilíbrio, de acordo com o parâmetro selecionado, para não ocorrer este tipo de instabilidade.

5.3.3. Impacto dos parâmetros não-lineares do comportamento dos materiais

A complexidade de cálculo introduzida na aplicação de modelos elásticos não-lineares de comportamento dos materiais, em comparação com os lineares, tem como consequência a diminuição substancial do passo de tempo requerido de integração na resolução do problema dinâmico, desta forma, sendo necessário mais esforço computacional.

Foi desenvolvido o estudo para avaliar o impacto que os parâmetros K_1 e K_2 da equação não-linear $K-\theta$ têm nos deslocamentos dos modelos não-lineares do programa *Pegasus*.

Esta avaliação está organizada por dois grupos de estudos. Cada grupo tem o modelo base (TESTE 1) com $K_1 = 50\,000$ e $K_2 = 0,5$, para serem comparados entre 2 outros modelos. A Tabela 5.6, a seguir, enumera os modelos gerados para este estudo.

É importante referir que K_1 está definido para somatório das tensões principais (θ) em MPa, por ser a unidade utilizada no programa *Pegasus*.

Tabela 5.6 Parâmetros K_1 e K_2 dos modelos utilizados

Modelo	K_1	K_2
TESTE 1	50 000	0.5
TESTE 2	50 000	0.7
TESTE 3	50 000	0.9
TESTE 4	70 000	0.5
TESTE 5	90 000	0.5

O primeiro grupo é a comparação entre os modelos TESTE 1, TESTE 2 e TESTE 3, com os três mantendo K_1 constante e igual a 50 000, variando os valores do parâmetro K_2 . O resultado das curvas de Módulo Resiliente (E_r) em MPa, por somatório das tensões principais (θ) em kPa, está representado na Figura 5.12.

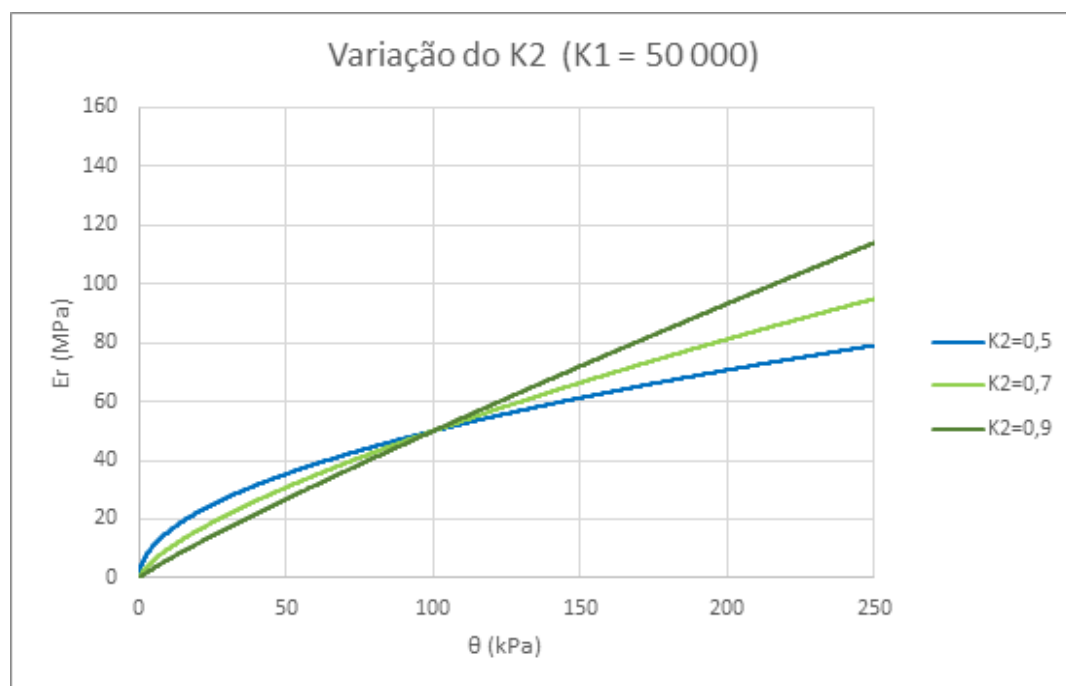


Figura 5.12 Impacto da variação do parâmetro K_2 nas curvas de módulo resiliente por tensões principais

Este gráfico demonstra que no intervalo de tensões principais abaixo dos 100 kPa, quanto maior o valor de K_2 menor o E_r e para valores superiores de tensões principais, o cenário é invertido.

O gráfico dos deslocamentos ao longo do tempo, revela que o aumento de K_2 origina deslocamentos maiores com a passagem do veículo circulante, como pode observar-se na Figura 5.13. reforçando a observação suprarreferida da diminuição de Er com o aumento do parâmetro K_2 , para o caso.

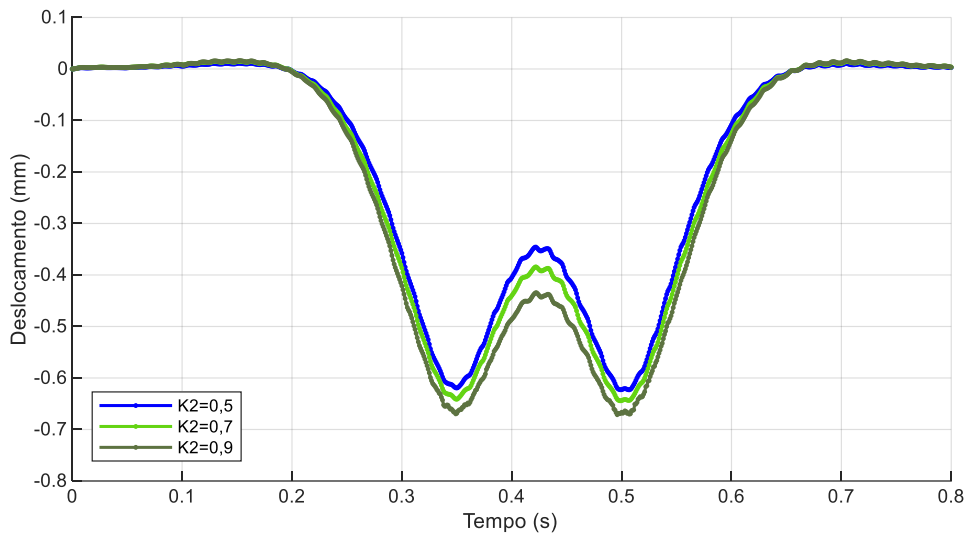


Figura 5.13 Impacto da variação do parâmetro K_2 nos deslocamentos ao longo do tempo

Também é possível observar a diminuição da diferença entre deslocamentos dos modelos, nos instantes da passagem das rodas dos comboios (aproximadamente 0,35 e 0,5s) em comparação ao instante de alívio entre as duas rodas (cerca de 0,43s).

O segundo grupo fixa o valor do K_2 em 0,5, alterando os valores da variável K_1 . O gráfico da Figura 5.14, com as curvas dos respetivos modelos TESTE 1, TESTE 4 e TESTE 5, demonstra que o aumento do parâmetro K_1 aumenta o valor de Er para qualquer valor de θ .

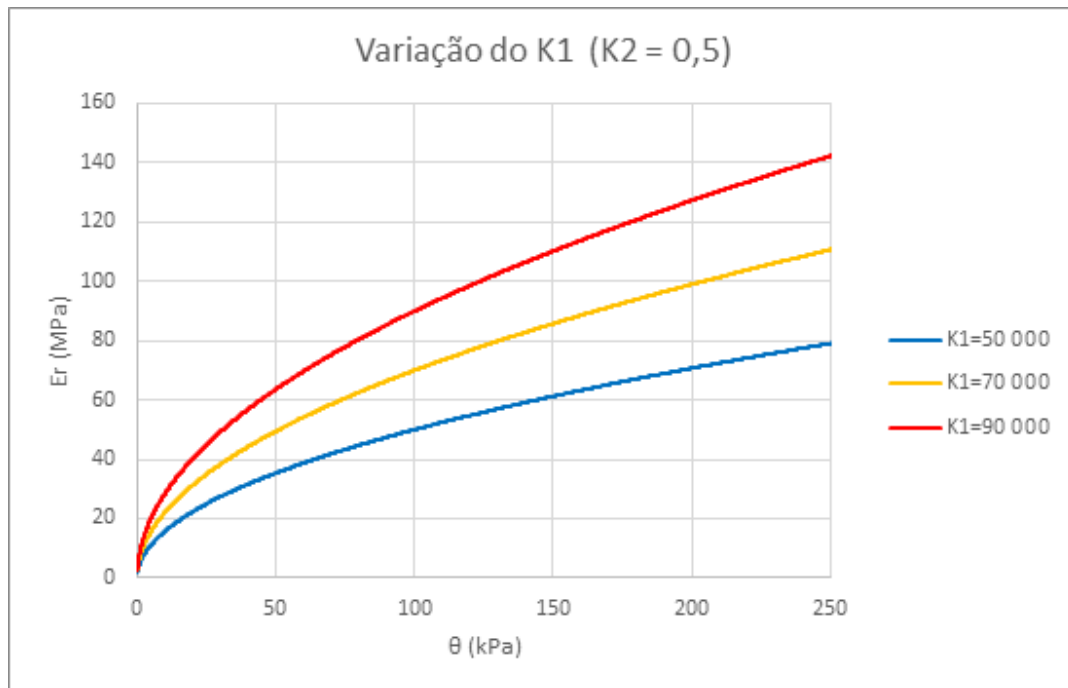


Figura 5.14 Impacto da variação do parâmetro K_1 nas curvas de módulo resiliente por tensões principais

O aumento de E_r é proporcional ao valor de K_1 , pelo fato deste parâmetro, na equação não linear $K-\theta$, ser um escalar que multiplica o valor de θ . Por este fato é possível concluir que o deslocamento para aumentos consideráveis de K_1 resultam em deslocamentos inferiores, ao longo do tempo com a passagem do comboio, como mostra a Figura 5.15.

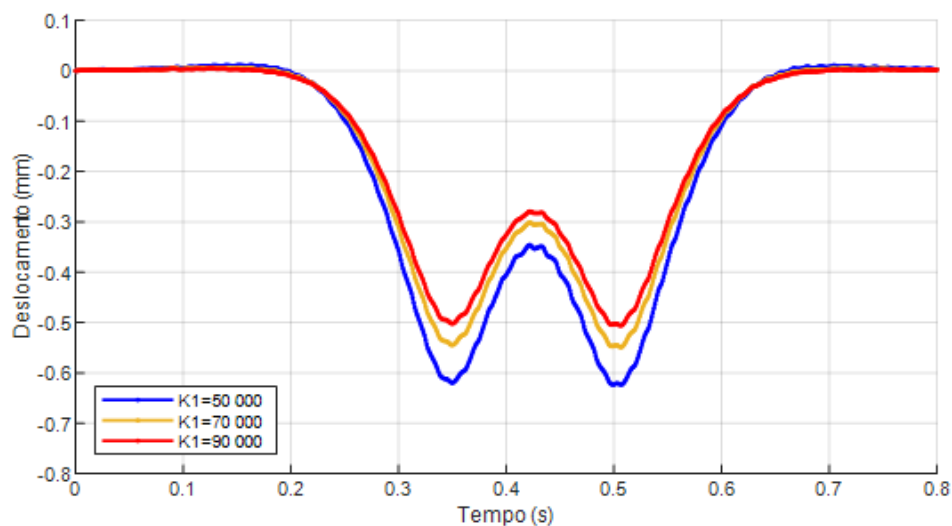


Figura 5.15 Impacto da variação do parâmetro K_1 nos deslocamentos ao longo do tempo

5.3.4. Comparação entre modelos lineares e não-lineares

A partir do estudo anterior, foi gerado o modelo aproximado, com os parâmetros da equação K- θ refinados para serem comparáveis com o modelo linear, na camada de balastro. Por modo iterativo adotou-se $K_1=140\ 000$ e $K_2=0,6$, dos parâmetros não-lineares para os deslocamentos do modelo se aproximarem aos do linear, com o módulo de elasticidade de 130MPa.

A primeira comparação é a nível dos deslocamentos ao longo do tempo, no carril acima da travessa central do modelo, como mostra a Figura 5.16. É possível observar a compatibilidade dos dois modelos a nível dos deslocamentos.

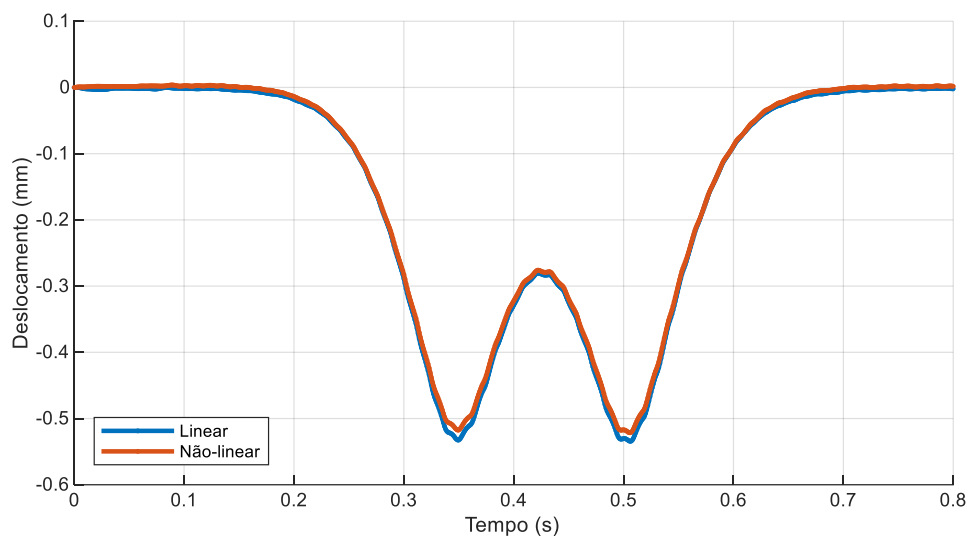


Figura 5.16 Comparação entre modelos elásticos lineares e não lineares do granito em deslocamentos no tempo

A avaliação do estado de tensão dos elementos da subestrutura, na presente dissertação, é realizada por duas formas distintas.

O primeiro caso é a visualização de um plano de corte com elementos da travessa central do modelo, no instante de tempo em que o eixo traseiro do veículo localiza-se acima da travessa.

Para exemplificar esta forma de visualização foi elaborada uma comparação do caso linear e não-linear. A Figura 5.17 representa as tensões normais no sentido do eixo z (σ_z), em dois planos xy , o primeiro à superfície da camada de balastro ($z=0,3m$) e o segundo entre as camadas de balastro e de sub-balastro ($z=0,0m$).

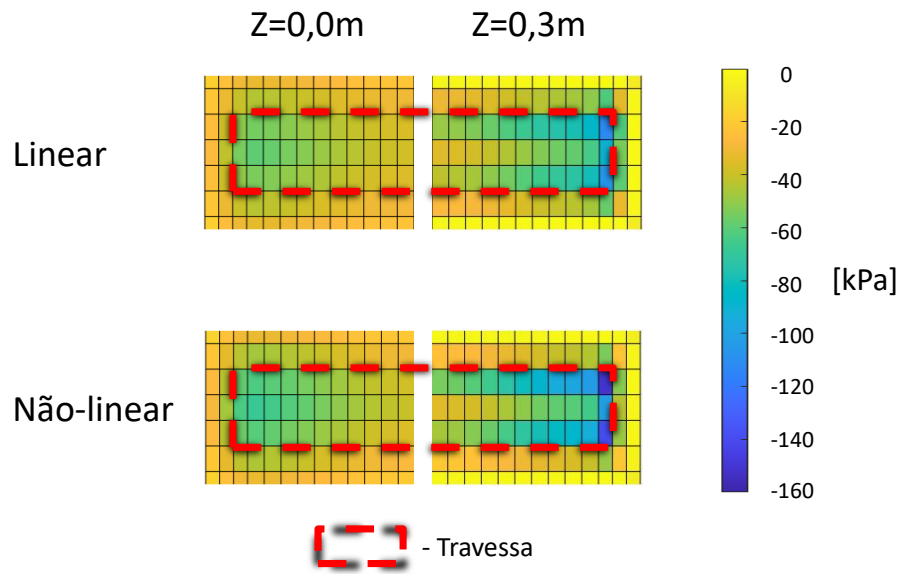


Figura 5.17 Comparação entre modelos lineares e não lineares em tensões σ_z no plano xy

Na Figura 5.17, referida acima, é possível observar maior diferença de tensões entre os modelos lineares e não-lineares, em ($z=0,3\text{m}$).

A segunda forma de avaliar as tensões dos modelos numéricos é pelo estado de tensão ao longo do tempo de um elemento. Os elementos seleccionados para as avaliações dos estados de tensões da camada de balastro, ao longo do tempo, tiveram como base os trabalhos (Paixão et al. 2016; José N. Varandas et al. 2016).

A disposição dos elementos no sentido transversal da via férrea (plano yz), como representado na Figura 5.18, está organizada em 3 elementos a superfície da camada de balastro (A, B e C) e mais 3 na camada de balastro sobre a camada de sub-balastro (D, E e F). Entre estes 6 elementos 3 pares podem ser destacados, os elementos abaixo do limite da travessa (A e D); os elementos abaixo do carril (B e E); os elementos ao centro da travessa (C e F).

O plano de corte destes elementos, ao longo do eixo x , está localizado nos elementos centrais da travessa central do modelo, por apresentarem resultados de tensões mais próximos dos convencionais.

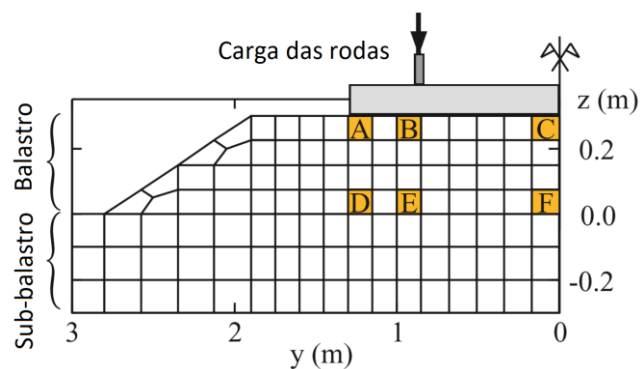


Figura 5.18 localização dos elementos utilizados para os estudos de tensões dos materiais alternativos, adaptado de (Paixão et al. 2016)

A comparação entre as tensões normais (σ) e de corte (τ) nas direções x , y e z , ao longo do tempo, demonstra a evolução das tensões de um elemento com a passagem do veículo. A Figura 5.19, ilustra este estudo para o caso linear e não linear, no elemento A.

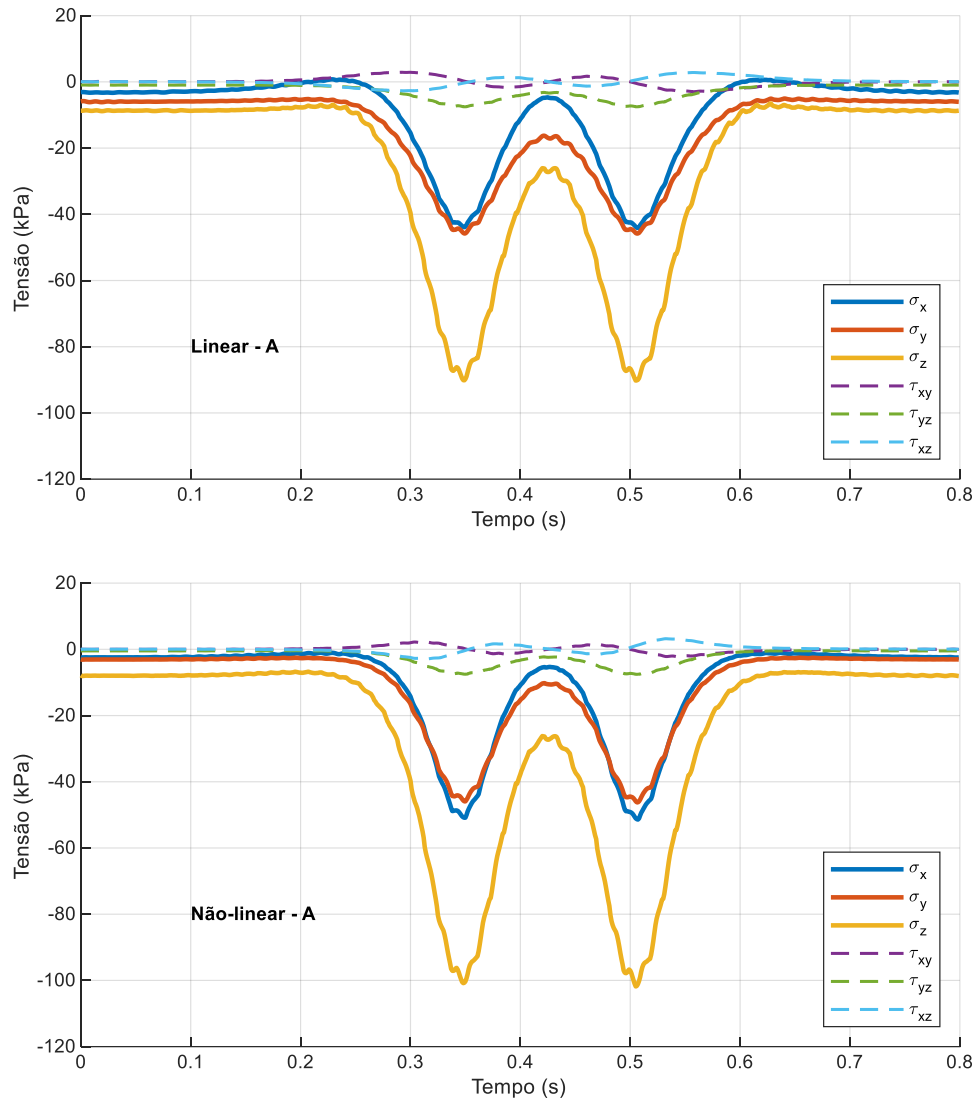


Figura 5.19 Comparação entre modelos lineares e não lineares de tensões normais e de corte, ao longo do tempo

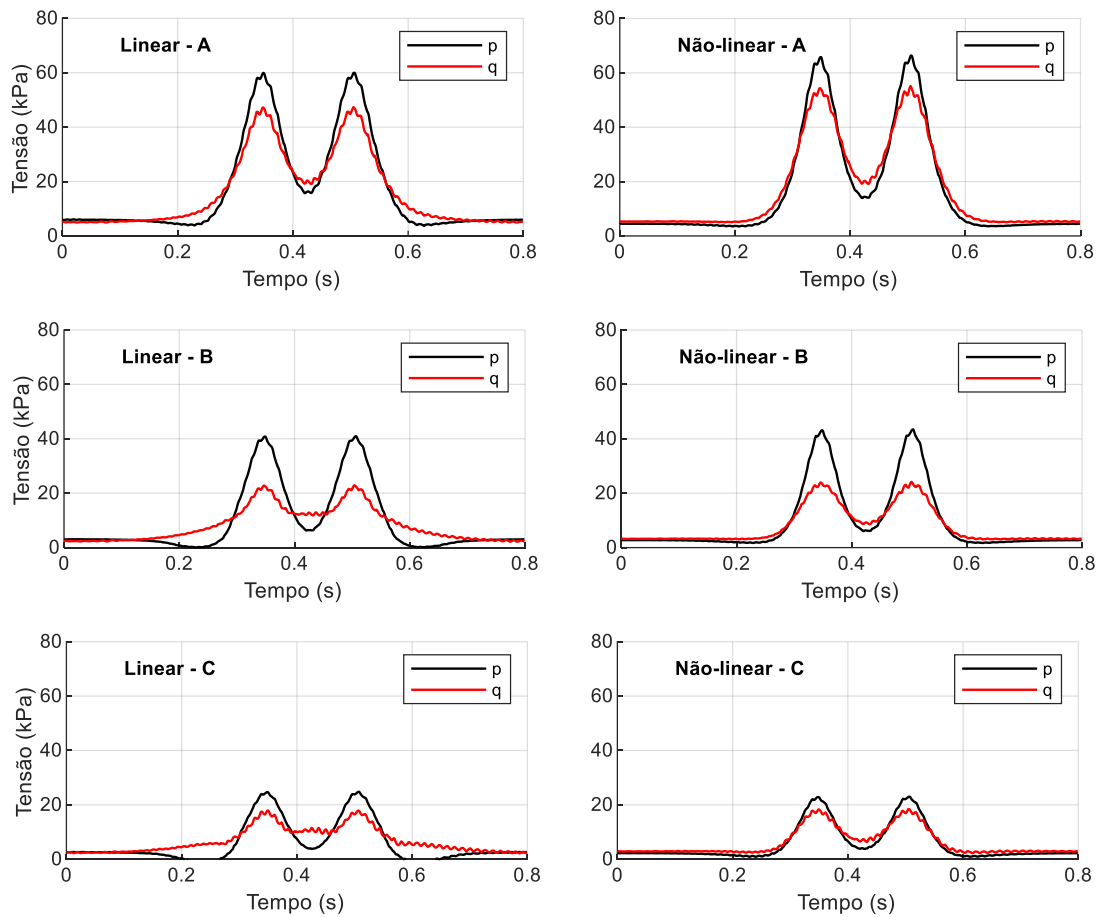
Na sequência da avaliação das tensões destes elementos, dois tipos de tensões são apresentados, médias (p) e deviatóricas (q). Estas tensões são descritas de acordo com as equações a seguir:

$$p = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (5.1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (5.2)$$

Ao relacionarmos q e p , podemos obter alguns comportamentos dos materiais granulares. A divisão de q por p , representa os esforços de corte que as partículas estão sujeitas. Quanto maior este rácio mais esforços os agregados estarão sujeitos, podendo ocasionar a rotura por corte destas partículas.

A Figura 5.20, ilustra a avaliação das tensões médias p e deviatóricas q , ao longo do tempo, comparando os modelos lineares e não-lineares, dos elementos do esquema da Figura 5.18, referida acima.



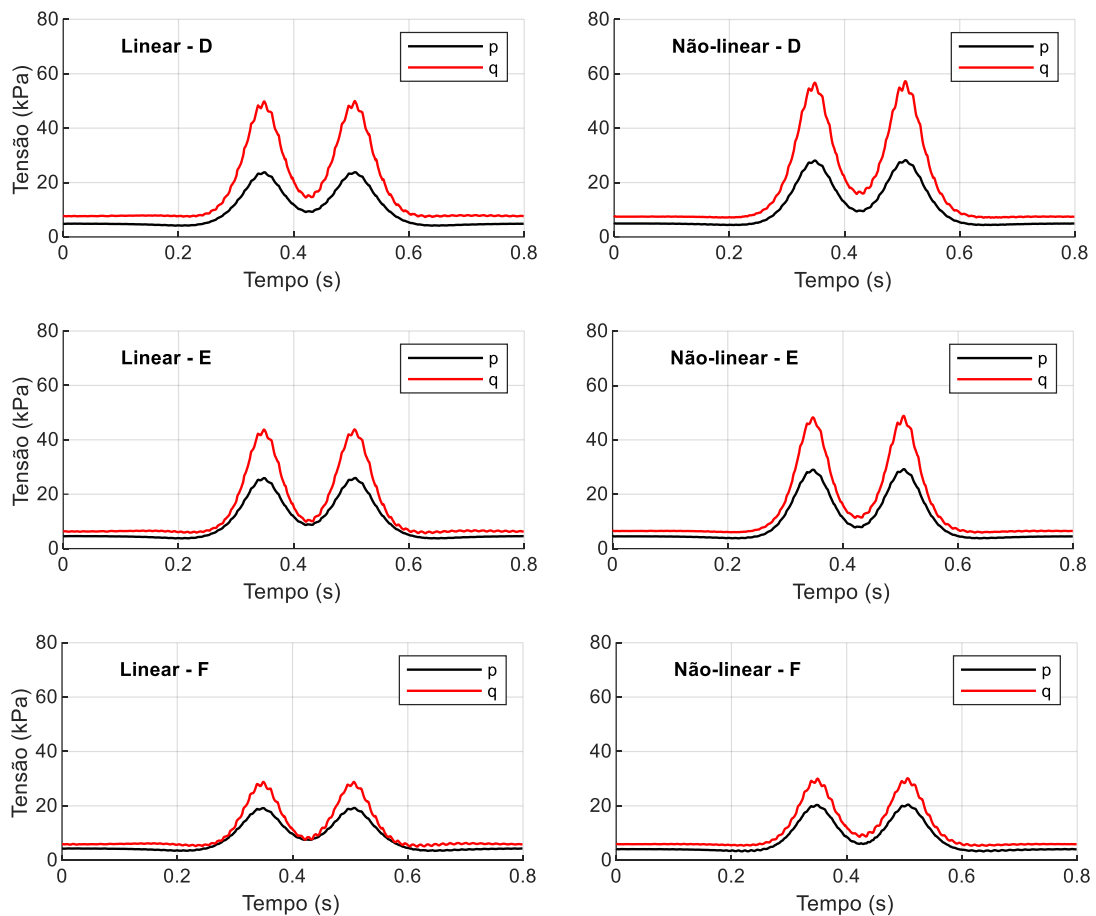


Figura 5.20 Comparação entre modelos lineares e não lineares de tensões médias e deviatóricas ao longo do tempo

Considerando que o modelo não-linear representa melhor o comportamento do balastro como observado em ensaios laboratoriais, pode concluir-se que os resultados obtidos em termos de tensões com o modelo não-linear serão mais próximos da realidade, comparando com aqueles obtidos com o modelo linear.

Como se pode observar na suprarreferida Figura 5.20, os resultados mais a superfície da camada de balastro (A, B e C) demonstram o aumento dos picos das tensões q e p , dos modelos lineares para os não-lineares, com exceção da tensão p do elemento C, onde ocorre uma ligeira redução.

Este aumento para o caso de veículos leves, como o selecionado para os estudos da presente dissertação (UQE2300), podem chegar até aos 10% das tensões médias e 15% das tensões deviatóricas, dos modelos lineares para os não-lineares, como é o caso do elemento A. Quanto mais pesado o veículo ferroviário maior será esta diferença, gerando problemas de segurança no dimensionamento de estruturas desta natureza.

Para os mesmos elementos a superfície, referidos acima, podemos observar que antes e depois de cada pico, a relação entre tensões q e p é reduzida, dos modelos lineares para os não-lineares, demonstrando que os modelos lineares, geram resultados com maior instabilidade a nível das tensões de corte.

Os resultados para zona acima da camada de sub-balastro (D, E e F), demonstram o aumento dos picos de tensões, a semelhança dos elementos a superfície (A, B e C), dos modelos lineares para os não-lineares. No caso do elemento F, esta diferença é pouco evidente, mas nos elementos nas extremidades da travessa, no sentido transversal da via férrea (D e E) as diferenças entre picos chegam a aproximadamente 15%, aumentando a tensão q em relação a p , aumentando os esforços de corte, nesta zona. Desta forma reforçando a problemática, no que se refere o dimensionamento deste tipo de infraestrutura, utilizado os modelos lineares em alternativa aos não-lineares.

Os gráficos da Figura 5.21 representam a análise das tensões q por p dos elementos mais a superfície, para ilustrar a diferença entre os elementos, observando que as tensões q estão maiores em relação as tensões p , dos modelos não-lineares se comparado com os modelos lineares.

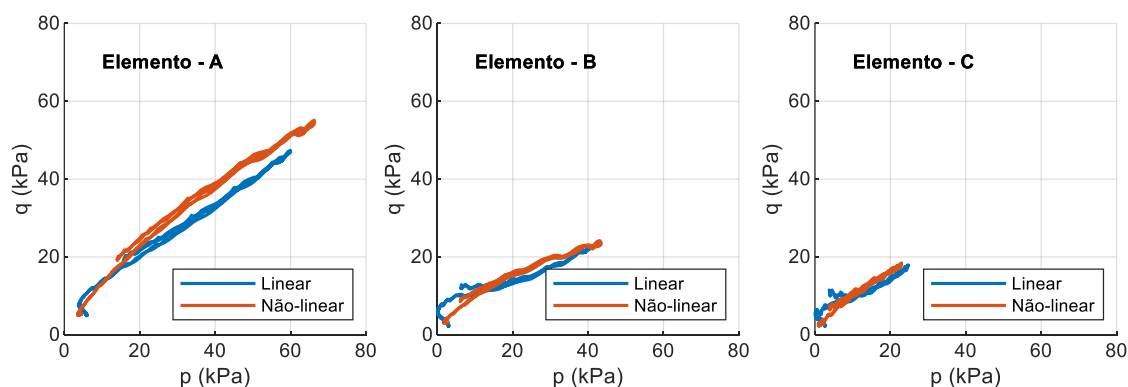


Figura 5.21 Comparação entre modelos lineares e não lineares em tensões médias por deviatóricas

A partir deste estudo, é possível concluir que a nível de deslocamentos a escolha do modelo linear e não-linear é indiferente. Em relação ao estado de tensões, os modelos não-lineares, estão mais ao lado da segurança, com resultados mais próximos a realidade.

5.4. Comparação dos resultados da modelação numérica com os registos de campo

Para cada dia foram utilizados 3 geofones da marca SYSCOM, com 3 sensores triaxiais Ms2003+ e 3 unidades de aquisição e gravação do sinal MR2002-CE cada, como representado na Figura 5.22. Os resultados analisados, dos obtidos por estes equipamentos, foram velocidades em mm/s, apenas na direção perpendicular ao carril (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013).



Figura 5.22 Sensor triaxial e unidade de aquisição e gravação do sinal, retirado de (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013)

5.4.1. Parâmetros do modelo de calibração adotado

O processo de calibração do programa *Pegasus*, para o caso, foi efetuado na extremidade da travessa central do modelo, com 1,2m de distância do centro no sentido transversal. Esta localização do ponto de análise foi condicionada pela localização da fixação do geofone, esquematizada pela Figura 5.23.

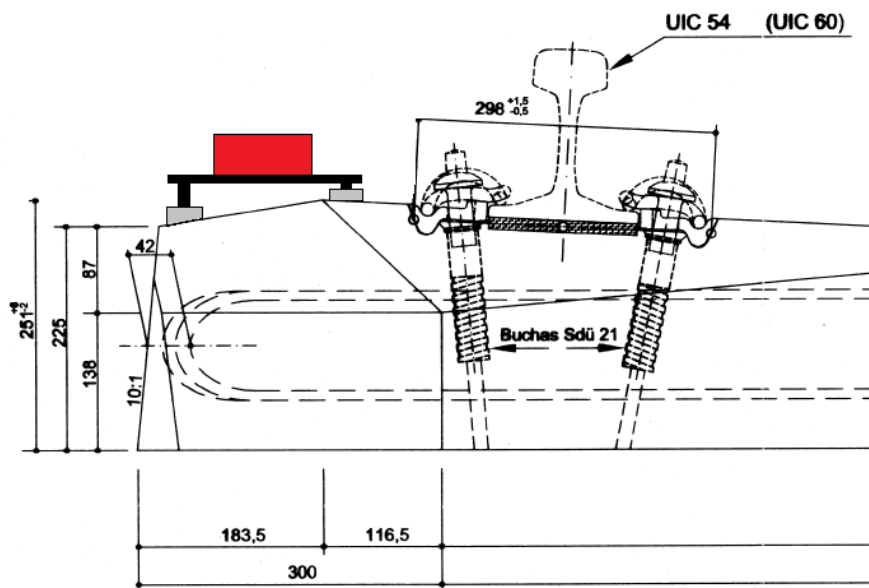


Figura 5.23 Esquema de fixação e montagem dos geofones nas travessas, retirado de (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013)

5.4.2. Análise dos ensaios do dia 06/06/12

Foi realizada a análise com os ensaios efetuados no dia 06/06/2012 com uma frequência de gravação dos geofones de 100 Hz, localizado em secção reta, fixados nas extremidades das travessas, como já referido anteriormente, e como mostra a fotografia da Figura 5.24.



Figura 5.24 Fotografia da localização dos geofones nos ensaios realizados no dia 06/06/12, retirado de (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013)

Os resultados selecionados para a calibração do modelo, para o veículo UQE2300, estão organizados pelos respetivos horários de gravação, registados pelo geofone, como se pode observar na Tabela 5.7. Todos os resultados foram aproveitados com a exceção das 12:05 horas, por apresentar resultados muito distorcidos, como será demonstrado a seguir.

Tabela 5.7 Horários com respetivos geofones utilizados no dia 06/06/12, retirado de (José Nuno Varandas, Silva, and Silva 2013)

Medições (hora)	Designação do Veículo	Tipo de Veículo	Nº de carruagens	Velocidade (km/h)
11:37	UQE2300	Suburbano CP	4	64
11:50	UQE2300	Suburbano CP	4	69
12:05	UQE2300	Suburbano CP	4	64
12:20	UQE2300	Suburbano CP	4	65
12:35	UQE2300	Suburbano CP	4	56
12:51	UQE2300	Suburbano CP	4	65

5.4.3. calibração das velocidades do modelo numérico

O gráfico representado na Figura 5.25, corresponde aos sinais em velocidades (mm/s) verticais no tempo (s) do geofone S4. É possível observar a discrepância do horário das 12:05 horas, que justifica a sua eliminação das análises de calibração do modelo.

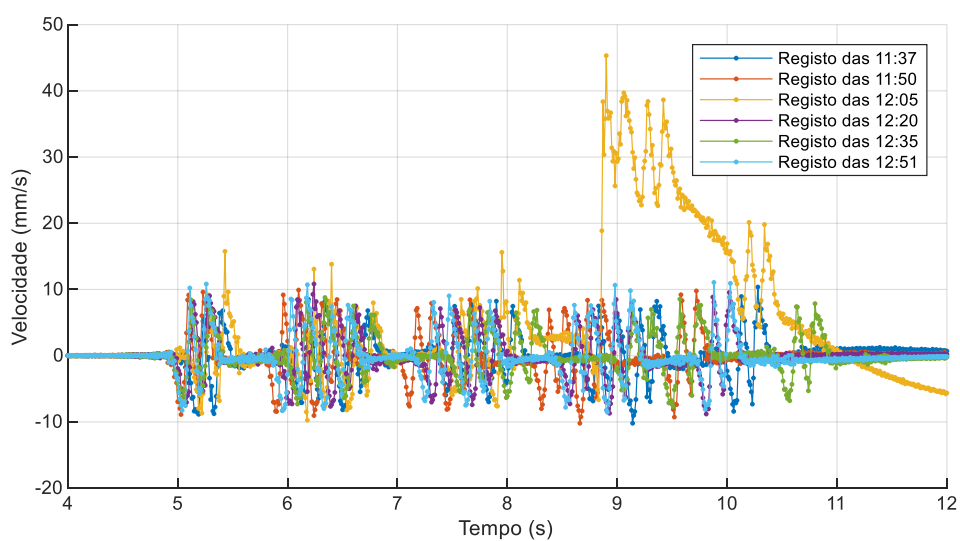


Figura 5.25 Gráfico com a discrepância de valores das 12:05 horas

A Figura 5.26 representa as velocidades, ao longo do tempo, dos ensaios seleccionados para o estudo de calibração do modelo. É possível observar que estão desfasados no tempo, por apresentarem velocidades distintas, como mostra a Tabela 5.7 suprarreferida.

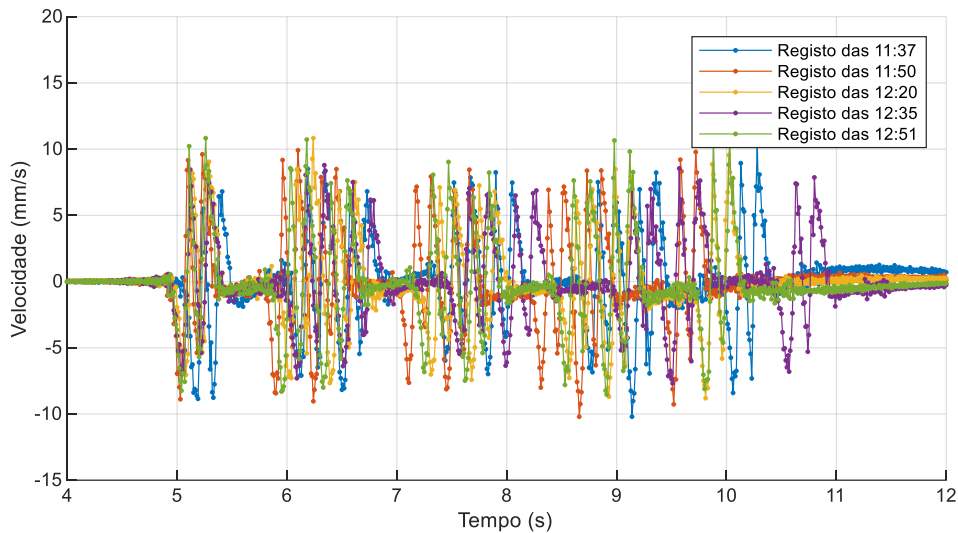


Figura 5.26 Gráfico com sinais de velocidades originais dos horários seleccionados

Para serem comparáveis com os valores da modelação, os sinais aproveitáveis do ensaio, foram tratados. Os ajustes dos sinais serão referidos na continuidade do presente capítulo.

O primeiro ajuste dos resultados foi do tempo, nomeadamente o ajuste pelas diferentes velocidades dos comboios em cada horário e a traslação para o instante em que a modelação numérica inicia. Como para o caso da modelação numérica, é representado apenas a passagem do primeiro bogie (com cargas máximas e mínimas), o período de tempo estudado são dos primeiros 0,8 segundos, como está destacado no gráfico da Figura 5.27

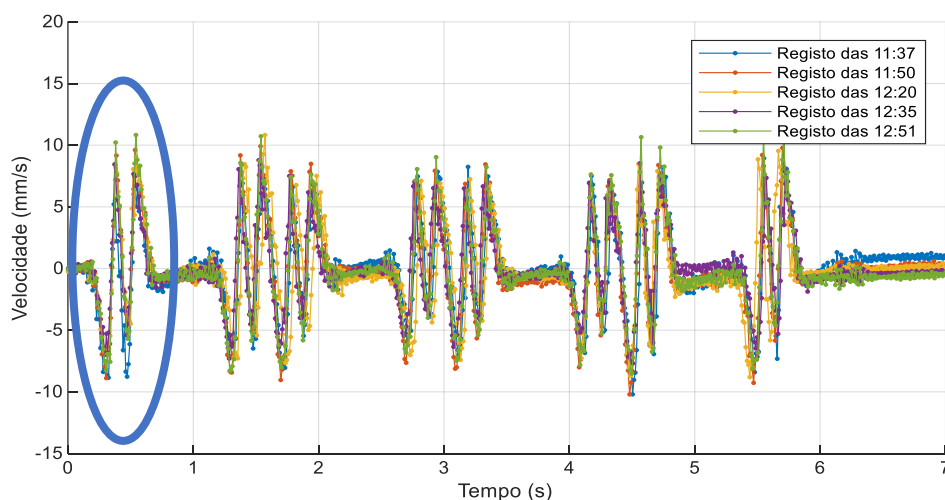


Figura 5.27 Gráfico com sinais de velocidades com alterações do tempo

A partir dos estudos preliminares efetuados no subcapítulo anterior (5.3) optou-se por calibrar o *Pegasus* pelo processo iterativo entre modelos elásticos lineares. Esta escolha foi condicionada pela calibração ser realizada em função dos deslocamentos e velocidades, ao longo do tempo, sendo indiferente a escolha de modelos lineares e não-lineares, em relação a aproximação dos resultados.

Dessa forma, o processo iterativo com modelos lineares teve o tempo de cálculo substancialmente reduzido, em relação ao caso alternativo com modelos não-lineares. Adotou-se os parâmetros representados na Tabela 5.8, a seguir, dentro das gamas de valores aceitáveis para os correspondentes elementos.

Tabela 5.8 Parâmetros adotados para o modelo de calibração

Parâmetro	Elemento	Valor adotado
Módulo de elasticidade (MPa)	Balastro	130
	Sub-balastro	200
	Coroamento	90
	Fundação	100
Rigidez na direção z (kN/m)	Palmilha de carril	800×10^3
Espessura(m)	substituição de fundação	1

As velocidades do *Pegasus* foram calculadas a partir da função $\text{diff}(x)$ (MathWorks Inc 2014), realizando a derivada do deslocamento ao longo do tempo, através da diferença entre pontos adjacentes.

A segunda alteração foi realizada para ajustar os tempos dos ensaios com duas simulações do *Pegasus*, com cargas mínima e máxima do comboio respetivamente, como mostra a Figura 5.28.

Na Figura 5.28, podemos observar os resultados das velocidades (mm/s), ao longo do tempo (s), da modelação numérica (Num) para as cargas máximas (vermelho) e mínimas (azul), ajustados aos registos dos geofones.

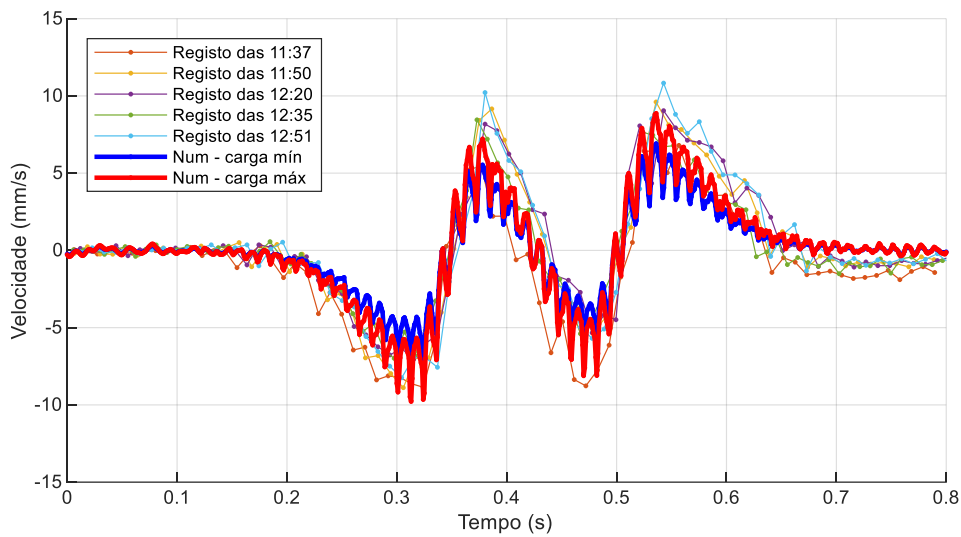


Figura 5.28 Velocidades com ajuste do tempo dos ensaios ao *Pegasus*

O próximo estudo foi a análise das frequências (Hz) com suas respectivas Amplitudes (mm/s), sendo estas geradas pela transformada de Fourier. A Figura 5.29 representa o gráfico com esta análise, onde observamos frequências acima dos 10Hz com amplitudes pouco significativas, para a precisão dos registros.

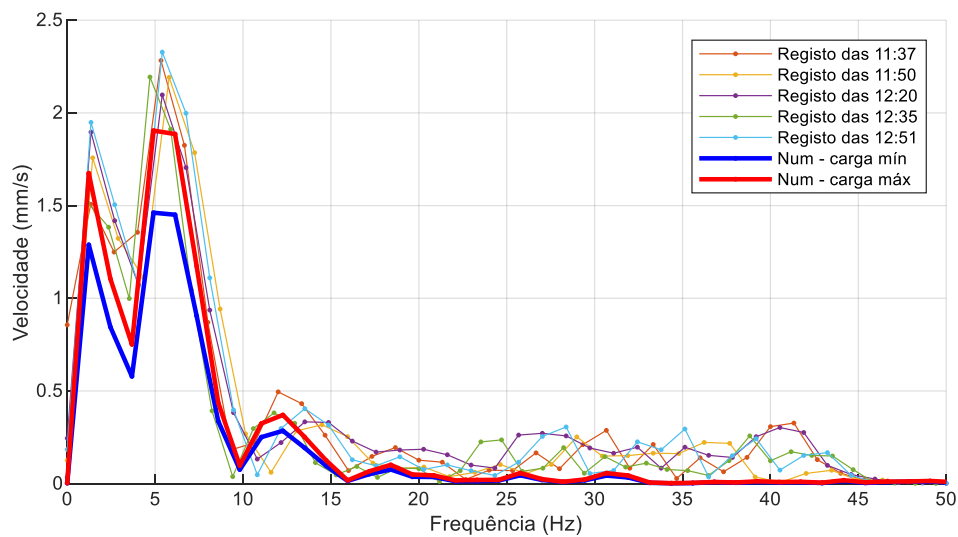


Figura 5.29 Amplitude das velocidades por frequência com tempo dos ensaios e o *Pegasus* ajustados

De seguida, foi realizada a modificação com a utilização de um filtro passa-baixo de 10 Hz, permitindo a passagem de baixas frequências e atenuando a amplitude das frequências mais elevadas aos 10 Hz, resultando nos gráficos das Figura 5.30 e Figura 5.31.

Nestes gráficos podemos observar a boa adaptação do modelo numérico aos registos, ao nível das velocidades.

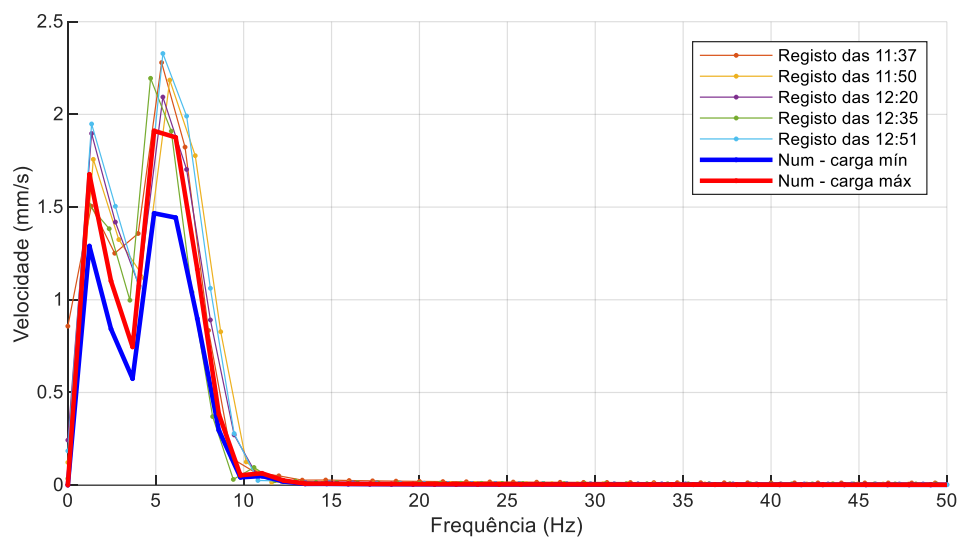


Figura 5.30 Amplitude das velocidades por frequência com tempo dos ensaios e o *Pegasus* ajustados filtrados

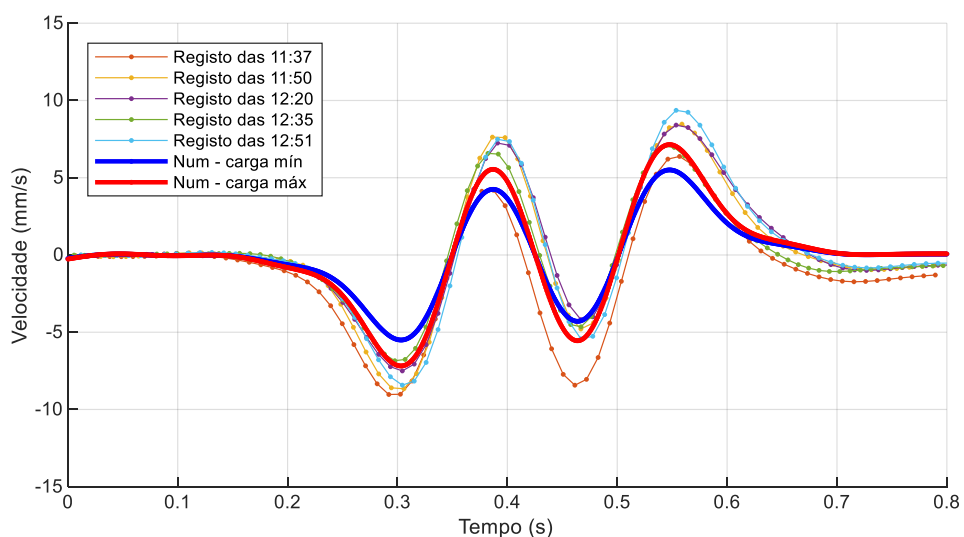


Figura 5.31 Velocidades filtradas no tempo

5.4.4. Calibração dos deslocamentos do modelo numérico

O estudo seguinte foi realizado com o propósito da obtenção dos deslocamentos dos registos, ao longo do tempo. Os deslocamentos dos registos de campo foram gerados a partir da integração das velocidades no tempo. O método numérico para a integração foi a função *cumtrapz(x)* (MathWorks Inc 2014), que gera resultados do integral cumulativo aproximado, pelo método dos trapézios.

É possível observar os deslocamentos (mm) ao longo do tempo (s) na Figura 5.32, com o modelo numérico (Num) já ajustado aos registos dos geofones. Neste gráfico é evidente a inclinação dos deslocamentos dos registos em relação aos das modelações numéricas.

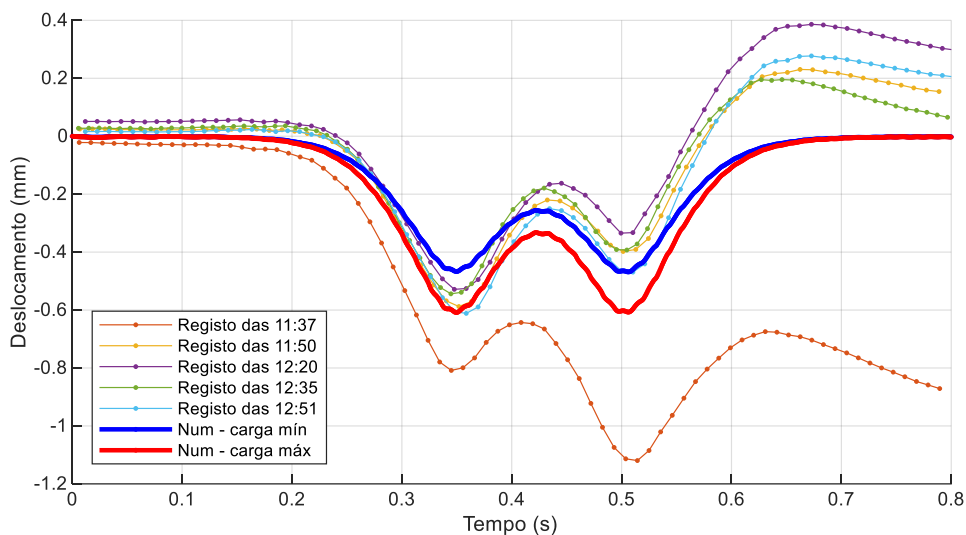


Figura 5.32 deslocamentos com tempo dos ensaios ajustados ao *Pegasus*

Para atenuar a inclinação foi subtraída uma combinação de 3 retas para o respetivo ensaio, originadas a partir da ligação de quatro pontos auxiliares, sendo o primeiro e o quarto, correspondentes aos primeiros e últimos pontos, respetivamente, dos deslocamentos no tempo do correspondente horário ensaiado. Os segundos e terceiros pontos estão localizados nas transições de deslocamentos retilíneos para não retilíneos. A Figura 5.33 representa a combinação de inclinações de ajuste para os respetivos registos.

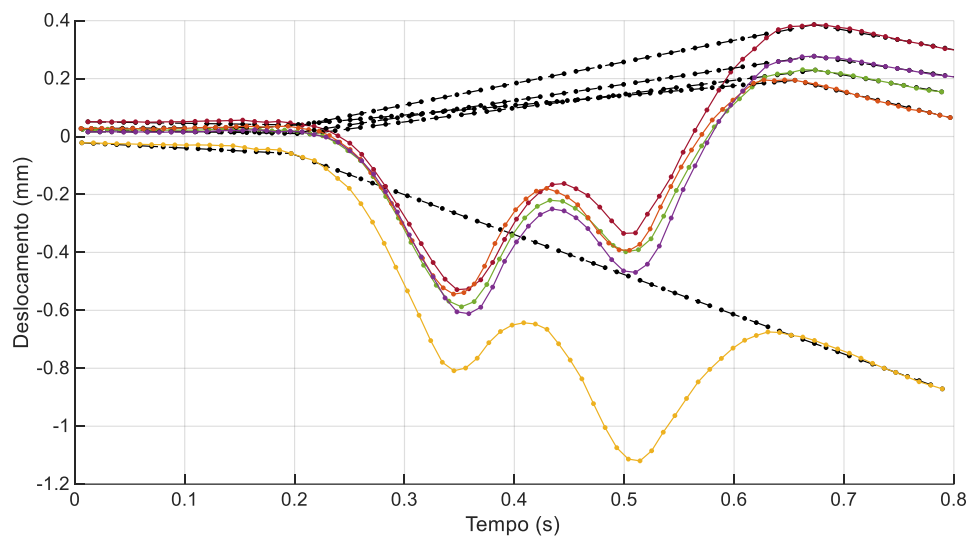


Figura 5.33 Deslocamentos com retas de ajuste

O resultado, após a subtração referida anteriormente, estão representadas nos gráficos da Figura 5.34 e Figura 5.35. A primeira em deslocamentos (mm) no tempo (s) e a segunda em amplitudes (mm) por frequência (Hz), sendo possível observar a falta de necessidade de filtragem dos sinais. Em ambos os gráficos, observamos a boa adaptação do modelo numérico aos registos de campo.

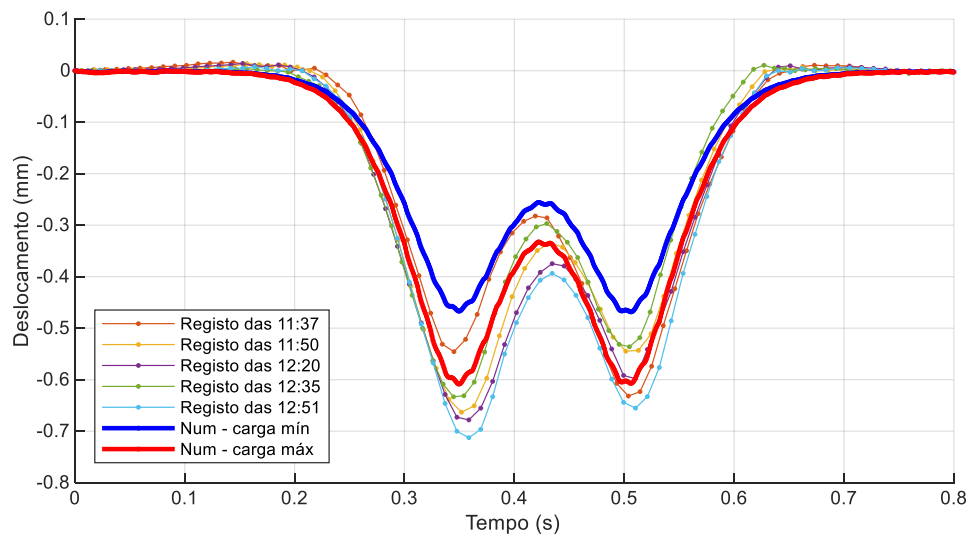


Figura 5.34 Deslocamentos ajustados

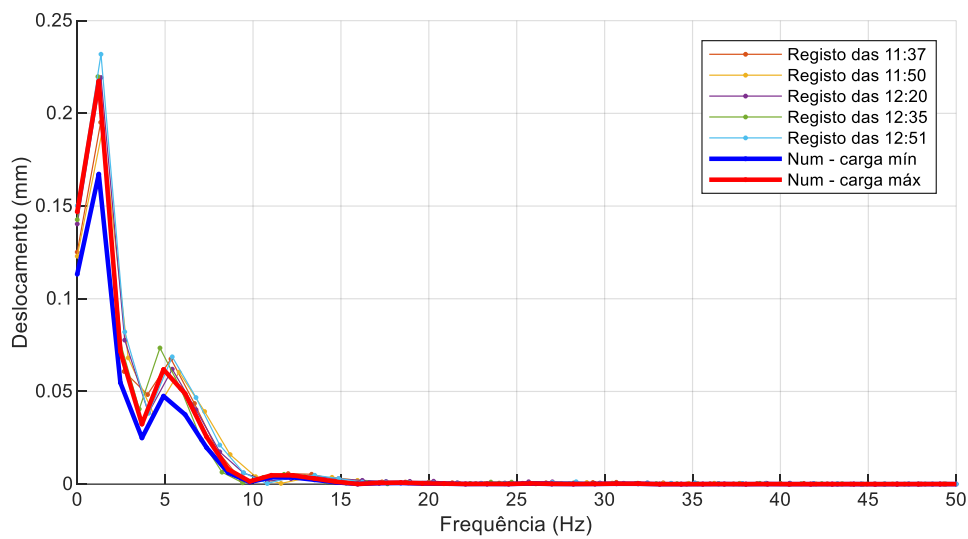


Figura 5.35 Amplitudes das frequências dos deslocamentos

5.4.5. Conclusões da calibração

O programa *Pegasus* demonstrou bom comportamento em relação ao ajuste dos deslocamentos e velocidades, ao longo do tempo, do modelo de calibração, aos registos do geofone selecionado.

As velocidades registadas estiveram próximas do intervalo de valores aceitáveis, entre cargas máximas e mínimas do comboio modelado. Desta forma, conclui-se que os valores dos parâmetros do *Pegasus*, apresentam-se calibrados.

Assim, a partir dos resultados desta análise, pode-se dar sequência aos estudos paramétricos com os materiais alternativos para as vias balastradas, com os parâmetros não utilizados para esta próxima análise, já calibrados.

6. Análise estrutural de vias-férreas com materiais alternativos na camada de balastro

6.1. Considerações iniciais

Os parâmetros geométricos e mecânicos para o estudo paramétrico do modelo numérico, são os mesmos da calibração do modelo presentes no Capítulo 5, com variação apenas das propriedades da camada de balastro. O presente capítulo, está subdividido em dois estudos.

O primeiro consiste na comparação entre agregados graníticos e o ASIC, na camada de balastro. Com os parâmetros utilizados para a realização dos estudos paramétricos dos ensaios laboratoriais descritos no subcapítulo (3.2.2).

O segundo com objetivo de avaliar os impactos do acréscimo de partículas de borracha nas camadas de balastro com ASIC. As variáveis dos modelos não-lineares foram adaptados dos ensaios laboratoriais descritos no subcapítulo (3.3.2).

À semelhança do subcapítulo dos estudos preliminares de comparação dos modelos lineares e não lineares (5.3.4), o presente capítulo terá como base as mesmas avaliações. Em ambos os casos, os elementos selecionados para as análises, são os mesmos da referida anteriormente Figura 5.18.

6.2. Adaptação dos parâmetros ensaiados aos da modelação numérica

Tendo em consideração os ensaios disponíveis e já referidos para aferir as propriedades mecânicas dos materiais alternativos (ASIC e partículas de borracha), foram construídos modelos numéricos com o programa *Pegasus* considerando esses materiais, através da definição adequada dos coeficientes K_1 e K_2 do Módulo Resiliente (Er).

Para o efeito, foi necessária a adaptação dos valores K_1 e K_2 presentes nas referências consultadas, à equação do modelo elástico não linear K - θ utilizada no programa *Pegasus*, que contempla um termo constante referido como tensão de referência θ_0 , tal como mostrado na equação (4.5). O ajuste dos parâmetros originados dos ensaios, para a equação (4.5) do *Pegasus*, será justificado matematicamente na sequência do presente subcapítulo.

$$Er = K_1' \theta^{K_2'} \quad (6.1)$$

Igualando a equação (4.5) utilizada no programa *Pegasus* à equação (6.1), obtém-se a seguinte equação:

$$K_1' \theta^{K_2'} = K_1 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{K_2} \quad (6.2)$$

Igualando K_2 (*Pegasus*) com K_2' (ensaio), e a seguir isolando K_1 (*Pegasus*) na equação (6.2) anterior resultou na seguinte equação (6.3), utilizada para aferir os valores dos parâmetros, utilizados na modelação numérica do presente capítulo

$$\begin{cases} K_2 = K_2' \\ K_1 = K_1' \theta_0^{K_2'} \end{cases} \quad (6.3)$$

6.3. Estudo paramétrico do ASIC

6.3.1. Comparação entre agregado granítico e ASIC dos parâmetros não-lineares

A Tabela 6.1, representada a seguir, corresponde aos parâmetros ,descrito em (3.2.2), obtidos a partir dos ensaios selecionados (MR Pós DP I correspondente a 1 milhão de ciclos) para os estudos paramétricos efetuados nas secções seguintes, como já referido no subcapítulo 3.2.2, e os adaptados ao *Pegasus*, com seus respetivos materiais.

É imperante referir que os parâmetros não-lineares estão representados para Módulos Resilientes e somatório das tensões principais, ambos em MPa, por serem as unidades utilizadas no programa *Pegasus*.

Tabela 6.1 Parâmetros do ASIC e agregado granítico ensaiados e adaptados ao *Pegasus*

Material	Ensaio	Ensaiaados		Adaptados para o Pegasus	
		K'_1	K'_2	K_1	K_2
ASIC	MR Pós DP I-A	883,97	0,7278	165438,9	0,7278
Agregado granítico	MR Pós DP I-G	647,62	0,825	96899,21	0,825

Ao utilizar os parâmetros adaptados ao modelo numérico na correspondente equação, resultou nos gráfico Figura 6.1, representadas a seguir. Este gráfico ilustra as curvas dos Módulos Resilientes (MPa) por somatório das tensões principais (adaptados de MPa para kPa, para melhor percepção), para os respetivos ensaios, comparando o granito com o ASIC.

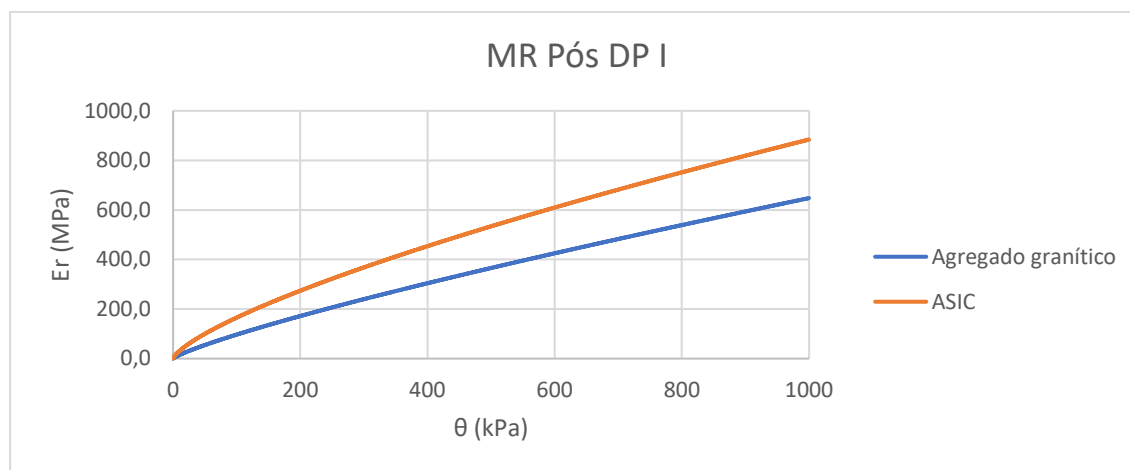


Figura 6.1 Comparação dos módulos resilientes entre ASIC e granito do ensaio MR Pós DP I

Para avaliar a evolução de E_r no interior da camada de balastro, ao longo do tempo, dos ensaios selecionados para as análises, são apresentados dois gráficos, o primeiro relacionado ao balastro granítico (Figura 6.3) e outro ao de ASIC (Figura 6.4). Estes gráficos mostram a evolução do módulo E_r nos seis elementos já referidos no Capítulo 5 (Figura 5.18), mas que se ilustram repetidamente na Figura abaixo.

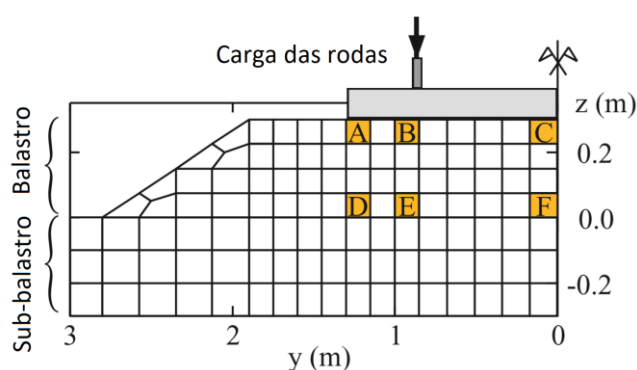


Figura 6.2 localização dos elementos utilizados para os estudos de tensões dos materiais alternativos, adaptado de (Paixão et al. 2016)

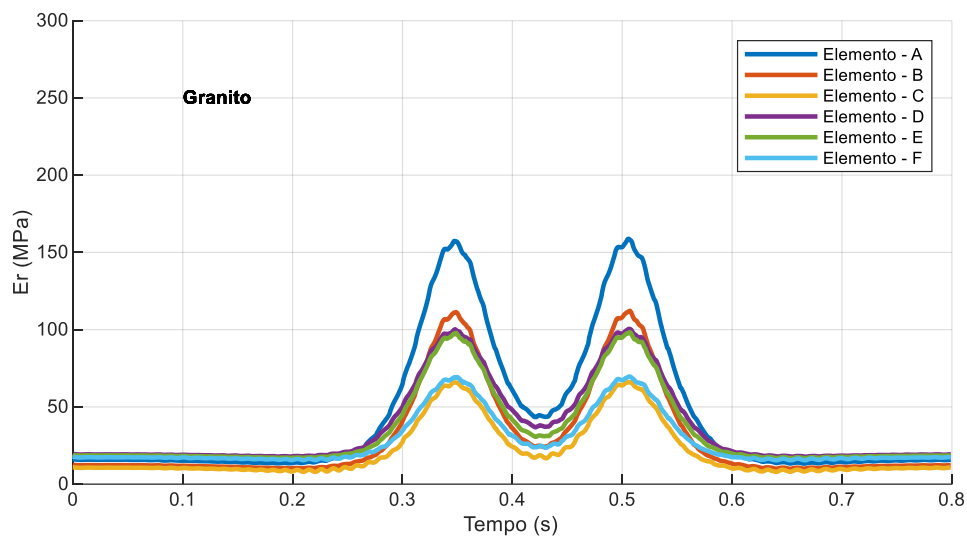


Figura 6.3 Evolução dos módulos resilientes ao longo do tempo, de balastro granítico

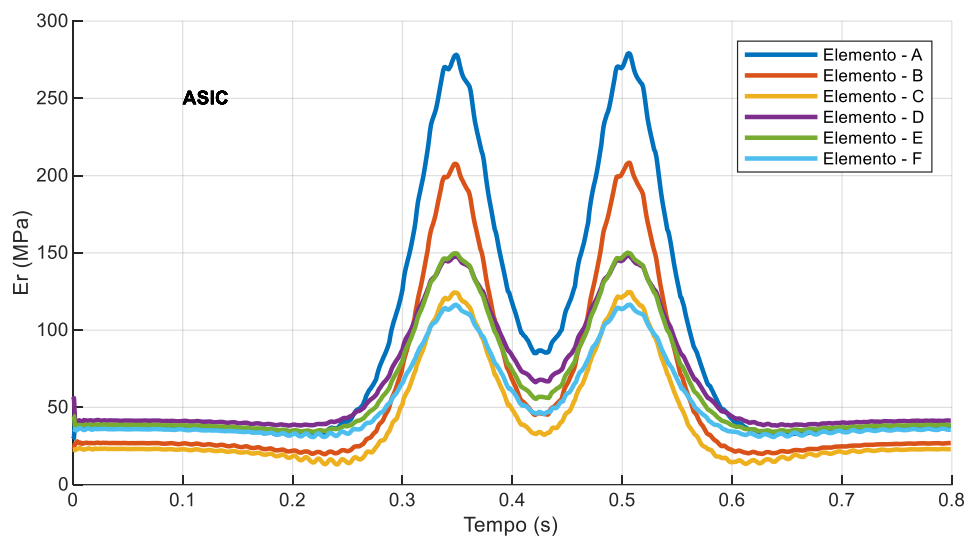


Figura 6.4 Evolução dos módulos resilientes ao longo do tempo, de balastro de ASIC

Nos gráficos referidos acima, é possível observar o aumento substancial do valor de E_r , ao longo do tempo com a utilização do ASIC em alternativa ao granito, chegando a valores de 80% superiores, nos picos de tensão do elemento A.

Este resultado demonstra a importância de utilizar modelos não-lineares em alternativa aos lineares, pela grande variação do Módulo Resiliente, chegando em valores superiores a 6 vezes, nos picos com a passagem do veículo ferroviário em relação ao estado de tensão inicial, como no elemento A.

No caso dos modelos lineares, este valor seria constante ao longo do tempo, por não haver variação do Módulo de Young (E) com o estado de tensão dos elementos, como já referido no subcapítulo 4.3.2.

6.3.2. Comparação entre agregado granítico e ASIC em deslocamentos

A comparação entre o balastro tradicional e a escória de aciaria em termos de deslocamentos, ao longo do tempo, foi efetuada em dois pontos distintos.

O primeiro na extremidade da travessa, ponto utilizado para calibração do modelo, representada na Figura 6.5. Neste gráfico pode-se observar que a utilização de ASIC em relação ao granito, reduz os deslocamentos em aproximadamente 10%, nesta zona.

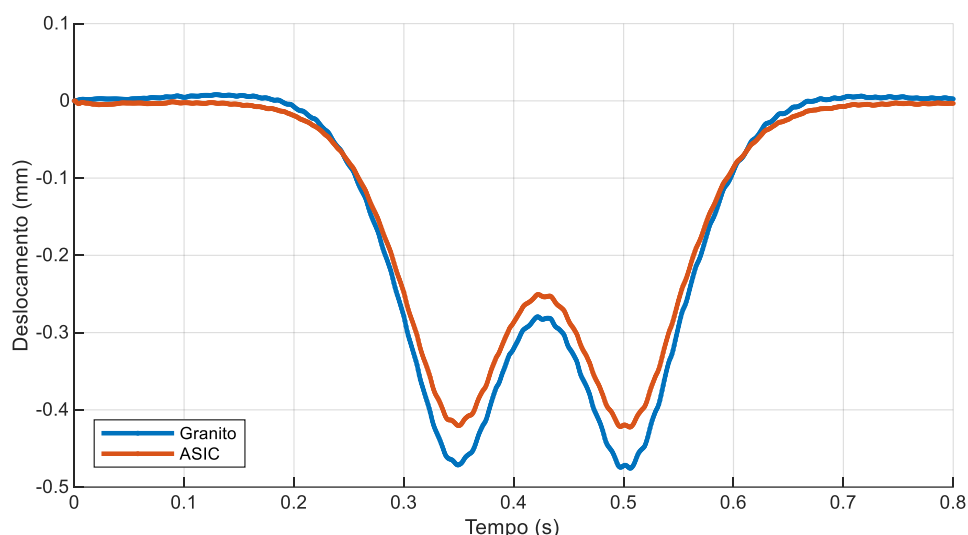


Figura 6.5 Comparação entre ASIC e granito nos deslocamentos ao longo do tempo, na extremidade travessa

O segundo ponto de análise dos deslocamentos é no carril acima desta mesma travessa, como mostra a Figura 6.6. Neste gráfico, observamos a redução proporcional deste ponto em análise em relação ao ponto na extremidade da travessa, de aproximadamente 10% dos deslocamentos de ASIC em alternativa aos agregados graníticos.

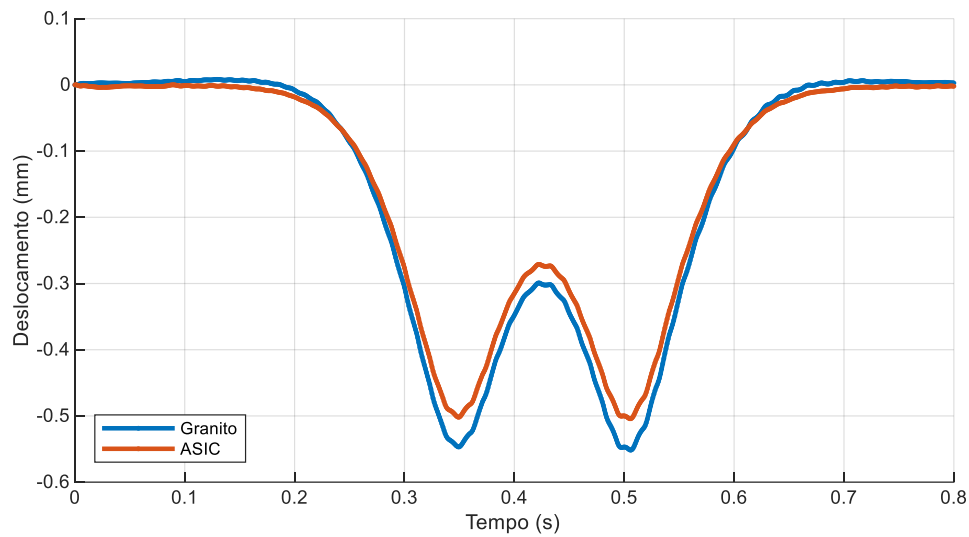


Figura 6.6 Comparação entre ASIC e granito nos deslocamentos ao longo do tempo, no carril

O comportamento de redução dos deslocamentos do ASIC em relação ao granito era esperado, devido ao aumento do Módulo Resiliente da escória de aciaria em comparação ao agregado tradicional, como referido anteriormente.

6.3.3. Comparação entre os estados de tensão no agregado granítico e no ASIC

O instante em que o deslocamento é máximo na travessa foi a escolha do momento para análise de tensões verticais (σ_z), dos elementos no plano xy .

Os valores de profundidade de $z=0,3$ m, são respetivos à superfície da camada de balastro. enquanto a profundidade de $z=0,0$ m, corresponde a zona entre as camadas de balastro e de sub-balastro.

Na Figura 6.7, é possível observar esta análise, com a redução evidente das tensões σ_z , em profundidade. A utilização de ASIC em alternativa ao granito, reduz o valor de σ_z à superfície da camada de balastro.

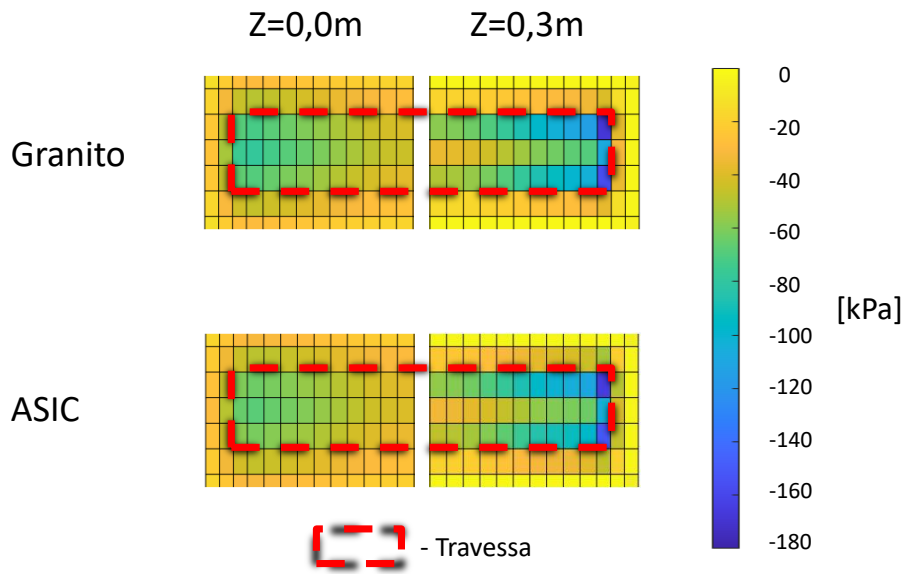


Figura 6.7 Comparação das tensões σ_z nas camadas de balastro de granito e de ASIC no plano xy .

Em sequência na Figura 6.8, são apresentadas as tensões normais (σ) e de corte (τ) do balastro granítico em comparação ao de ASIC, para o elemento mais esforçado (A). Ao observar a comparação entre os dois materiais granulares, o granito apresenta tensões normais e de corte menores, com a exceção da tensão vertical (σ_z), em relação ao ASIC.

O ASIC aumenta nos picos de tensões, as tensões normais, nas direções do plano (σ_x e σ_y), em aproximadamente 20%. No caso das tensões de corte (τ) nas três direções, aumenta em cerca de 100%. Enquanto a redução da tensão normal vertical (σ_z) é de 6%.

Como a tensão (σ_z) normalmente é mais condicionante, devido aos elevados valores de pico, a redução de 6% destas tensões, ao utilizar ASIC em alternativa ao agregado granítico, para passagem de veículos com elevadas cargas, pode ser um fator mais benéfico para o dimensionamento de estruturas desta natureza, do que o aumento das outras tensões.

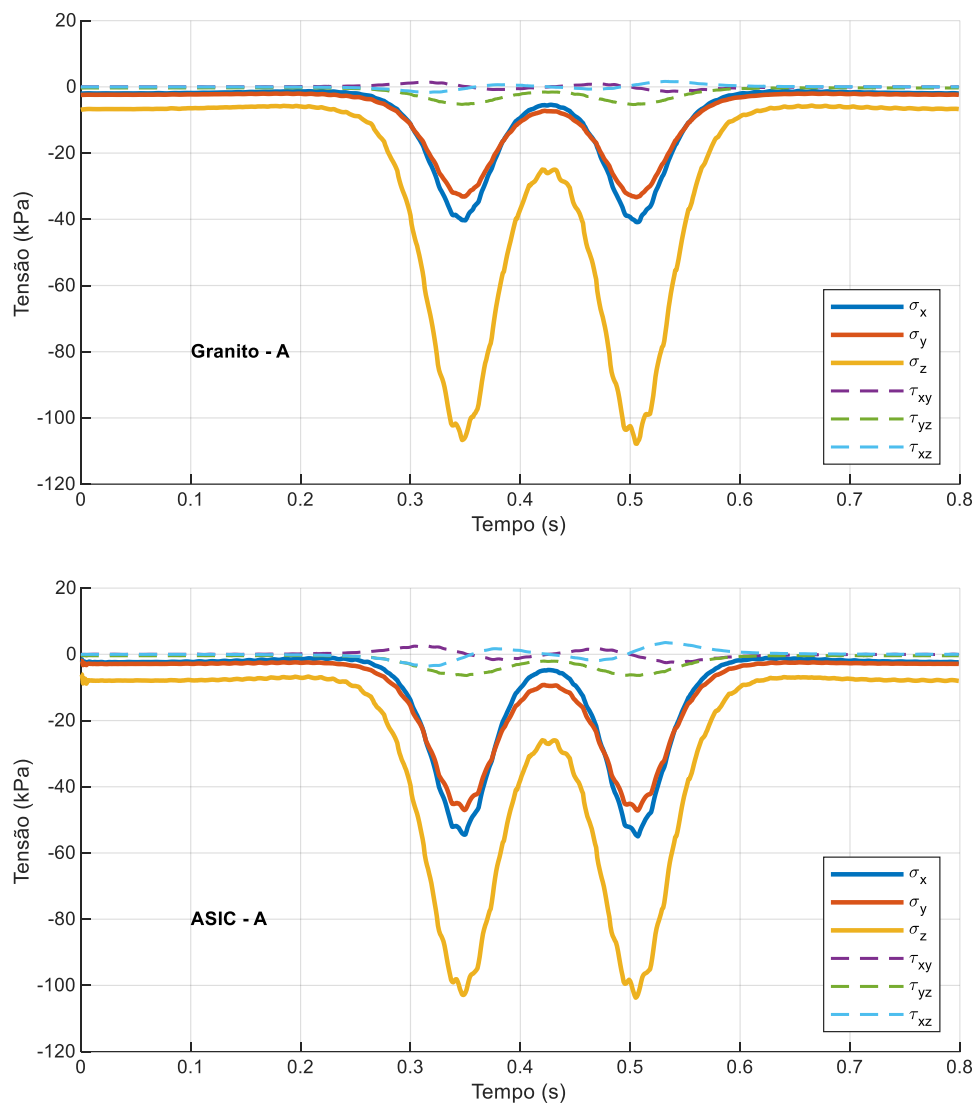


Figura 6.8 Comparação da evolução no tempo das tensões normais e de corte nas camadas de balastro de granito e de ASIC

As tensões médias (p) e deviatóricas (q) são os próximos parâmetros de análise. Na Figura 6.9 é possível observar este estudo.

Nos elementos mais a superfície da camada de balastro (A, B e C), a substituição do material tradicional para o alternativo, resulta na diminuição das tensões deviatóricas e no aumento das tensões médias, aumentando reduzindo os esforços por corte.

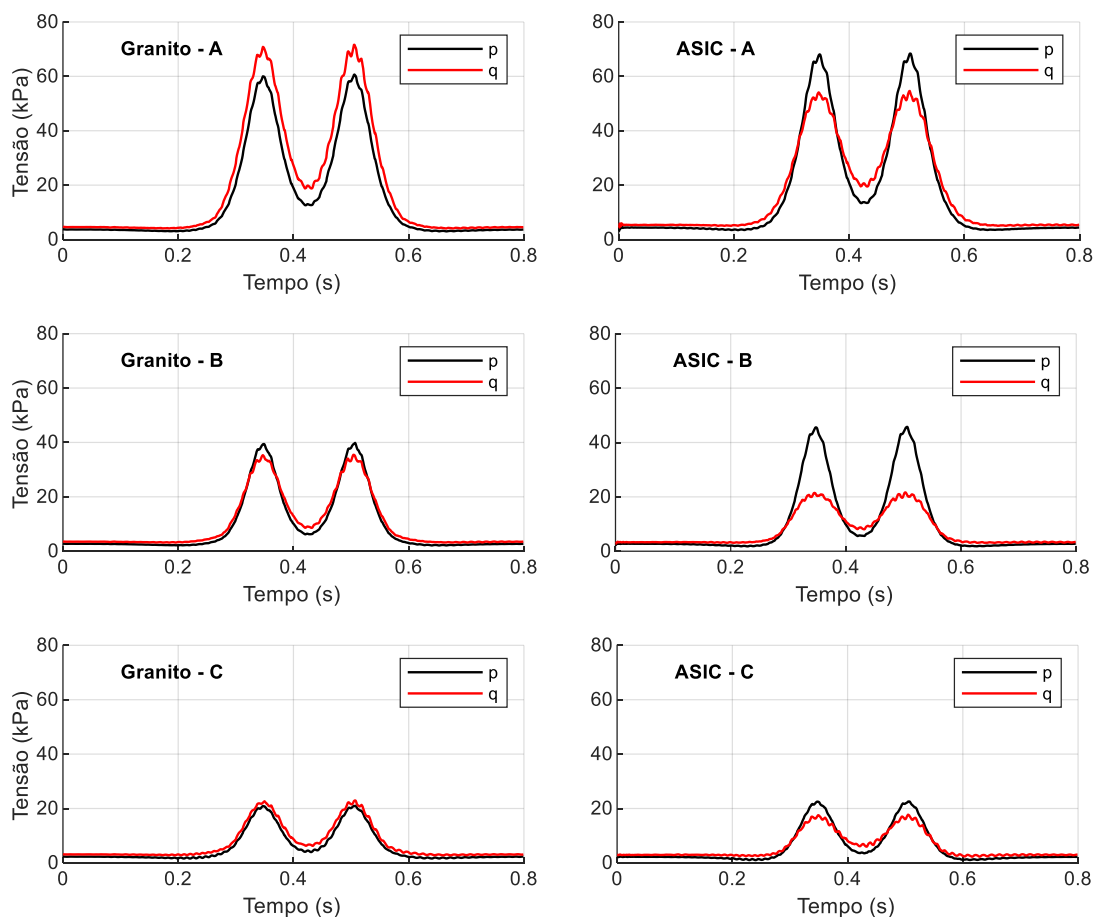
No elemento A, o ASIC, reduz em 30% as tensões deviatóricas e aumenta em 15% as tensões médias, em alternativa ao granito. No elemento B, o material alternativo reduz em 75% as tensões q e aumenta em apenas 10% as tensões p . Enquanto para o elemento C, as tensões q são

reduzidas em 20% e as tensões p em 10%, ao utilizar a escoria de aciaria como alternativa ao agregado granítico.

Ao compararmos os picos das tensões, do ASIC com os do granito nos elementos a superfície, concluímos que as reduções das tensões q , são sempre superiores aos aumentos das tensões p .

Para os elementos acima da camada de sub-balastro (D, E e F), a utilização da escoria de aciaria em alternativa aos agregados graníticos, ocasiona a redução dos picos das duas tensões (p e q) de forma proporcional, esta forma, não havendo diferenças evidentes a nível de esforços de corte.

Os picos de tensões para o elemento D, reduzem em aproximadamente 10% para as duas tensões, enquanto para os elementos E e F, esta redução é inferior, cerca de 5%.



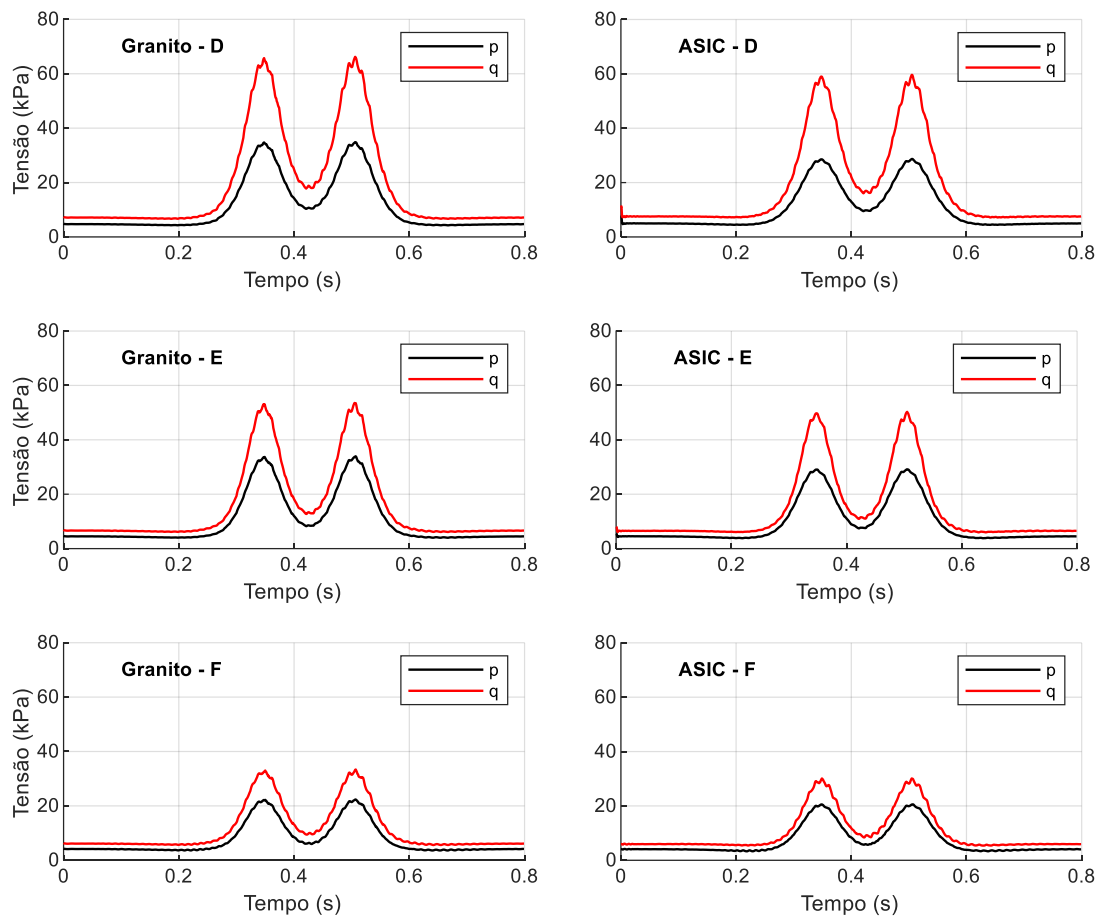


Figura 6.9 Comparação tensões médias e deviatóricas ao longo do tempo nos elementos A a F nas camadas de balastro de granito e de ASIC

Os gráficos das tensões médias por deviatóricas, referentes à Figura 6.10, está representada a seguir, para os elementos a superfície da camada de balastro (A, B e C).

Podemos observar que a utilização de ASIC em alternativa aos balastros tradicionais reduz as tensões q em relação as tensões p , como referido anteriormente. Desta forma, diminuindo os esforços de corte, ocasionando no funcionamento ao corte menos crítico, nestes elementos.

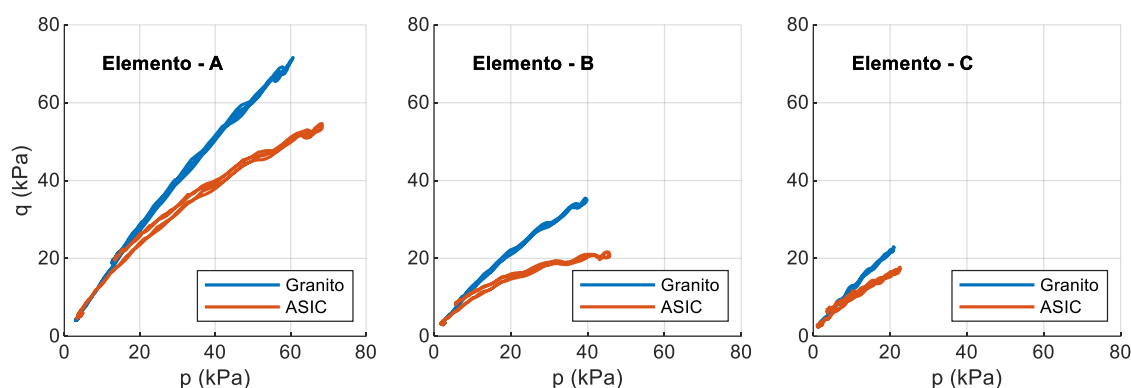


Figura 6.10 Comparação das trajetórias de tensões no espaço (p, q) nos elementos A, B e C nas camadas de balastro granítico e de ASIC

6.4. Estudo paramétrico do acréscimo de borracha

6.4.1. Avaliação da adição de borracha nos parâmetros não-lineares

Para avaliar o efeito do acréscimo de borracha na camada de balastro, optou-se por utilizar como modelo base (sem borracha), o modelo de ASIC ensaiado com 1 milhão de ciclos, referido no subcapítulo anterior. Essa escolha tem como finalidade avaliar a utilização de dois materiais alternativos, ecologicamente mais sustentáveis, em simultâneo, na camada de balastro

O estudo teve como base a redução do parâmetro K_1 , para cada adição de percentagem de borracha, como já foi referido na Tabela 3.2. Ao reduzir este parâmetro do modelo base de ASIC sem partículas de borracha (0%), para cada mistura com borracha, e alterando o foco de estudo, original de da camada de sub-balastro para de balastro, originando os modelos da Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Parâmetros não-lineares de ASIC com respectivas percentagens de borracha

Material	Variação	K_1	K_2
ASIC 0%	0%	165438,9	0,7278
ASIC 1%	-6%	155098,9	0,7278
ASIC 2.5%	-19%	134419,1	0,7278
ASIC 5%	-56%	72379,5	0,7278

Para uma melhor análise do comportamento resiliente da adição de borracha, são apresentados os gráficos da Figura 6.11 até a Figura 6.14, ilustrando a evolução do Módulo Resiliente (E_r) em MPa, ao longo do tempo, para todos os elementos analisados.

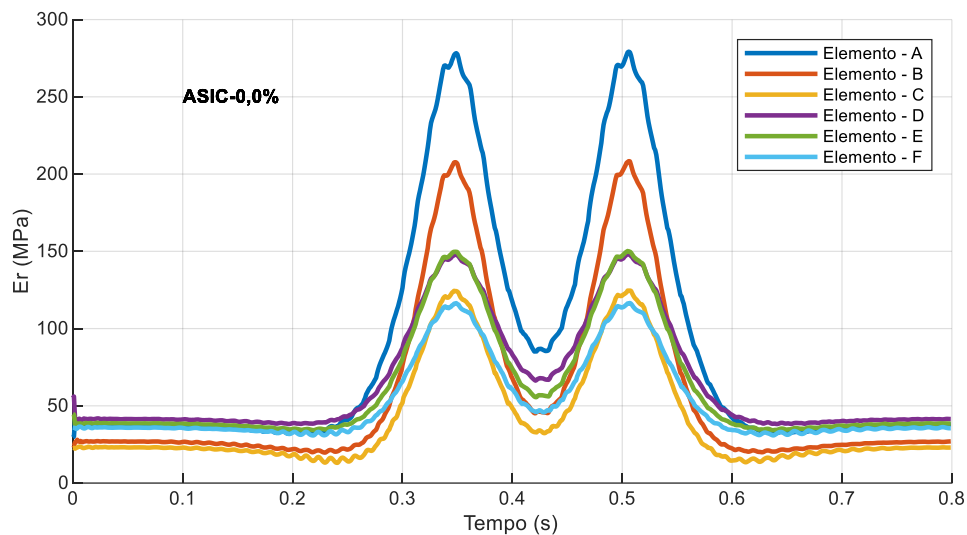


Figura 6.11 Evolução dos módulos resilientes ao longo do tempo, de ASIC sem borracha

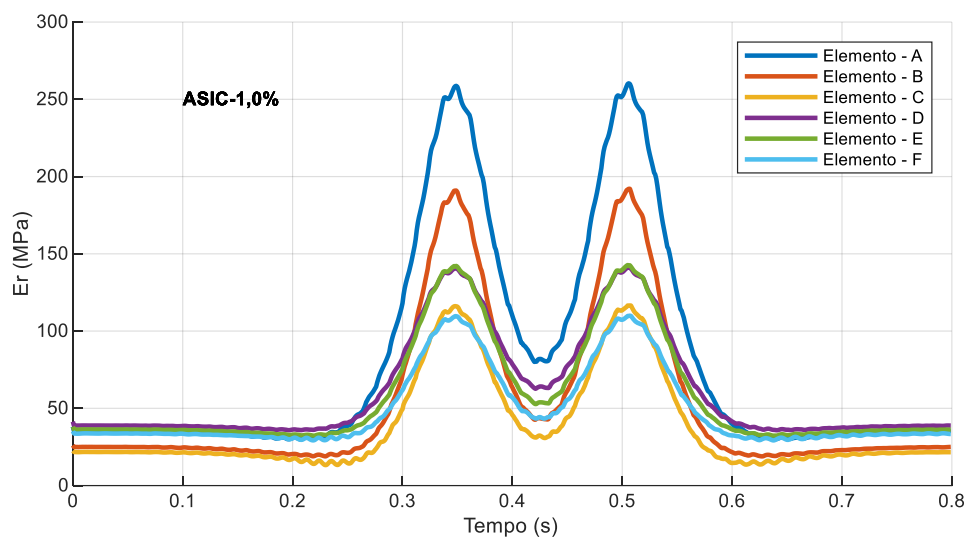


Figura 6.12 Evolução dos módulos resilientes ao longo do tempo, de ASIC com 1,0% de borracha

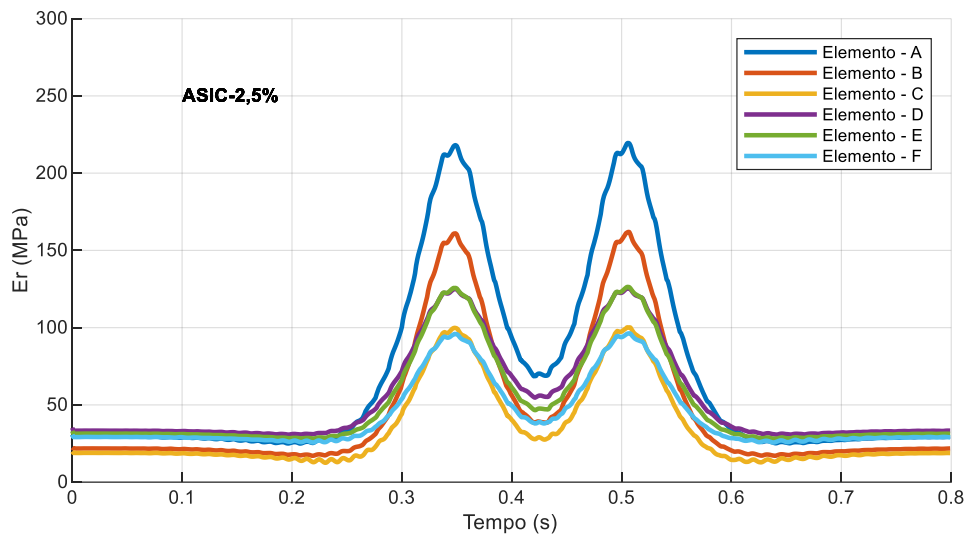


Figura 6.13 Evolução dos módulos resilientes ao longo do tempo, de ASIC com 2,5% de borracha

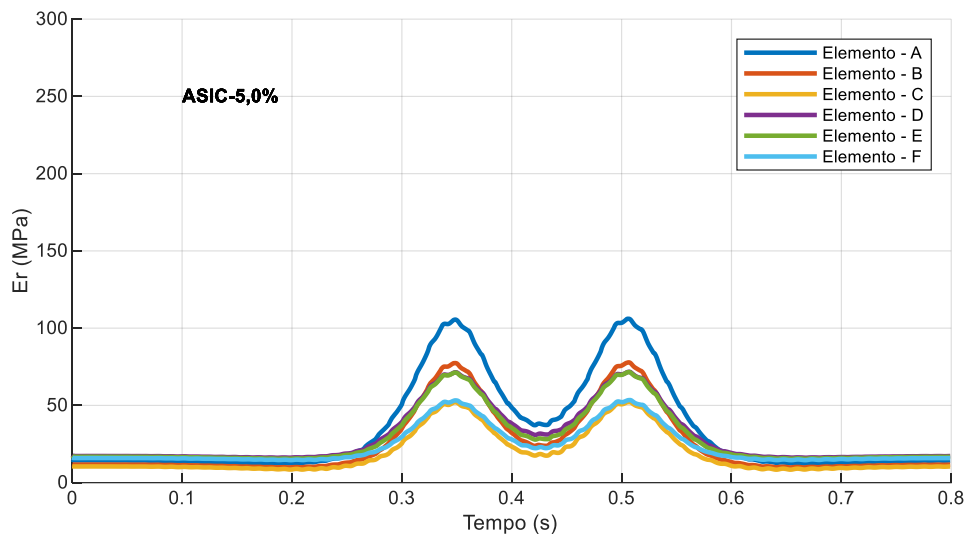


Figura 6.14 Evolução dos módulos resilientes ao longo do tempo, de ASIC com 5,0% de borracha

Nos gráficos acima, é evidente a redução de E_r em todos os elementos, com o acréscimo de partículas de borracha, na camada de balastro composta por ASIC. Ao comparar o elemento A, dos modelos de ASIC-0,0% com o ASIC-5,0%, observamos que o acréscimo de 5% de partículas de borracha reduz em aproximadamente 65% o Módulo Resiliente da camada de balastro com escória de aciaria.

6.4.2. Avaliação da adição de borracha nos deslocamentos

A comparação dos deslocamentos ao longo do tempo, está representada na Figura 6.15 para a extremidade da travessa central do modelo. Nesta zona o acréscimo de 5% de partículas de borracha na camada de balastro com ASIC, gera o aumento dos picos de deslocamentos de aproximadamente 20%.

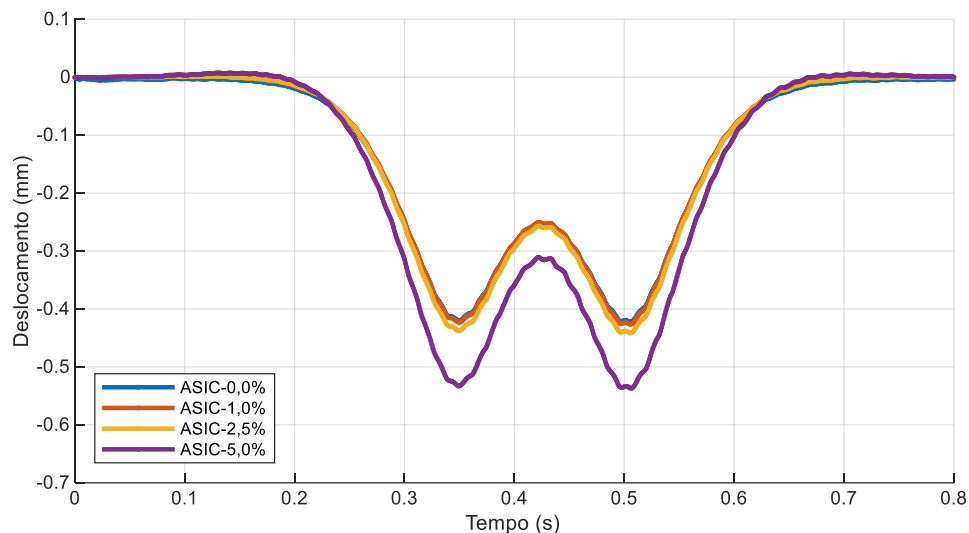


Figura 6.15 Avaliação do acréscimo de borracha em balastro de ASIC nos deslocamentos ao longo do tempo, na extremidade travessa

Na Figura 6.16, o ponto de análise está situado no carril acima da mesma travessa. Neste gráfico observava-se o aumento dos picos de deslocamentos de aproximadamente 20%, com o acréscimo de partícula de borracha ao ASIC. Desta forma concluindo o aumento proporcional nos dois pontos de análise.

Este aumento de deslocamentos é resultado da diminuição de E_r , que o aumento de percentagem das partículas de borracha na escoria de aciaria apresentou, como referido anteriormente.

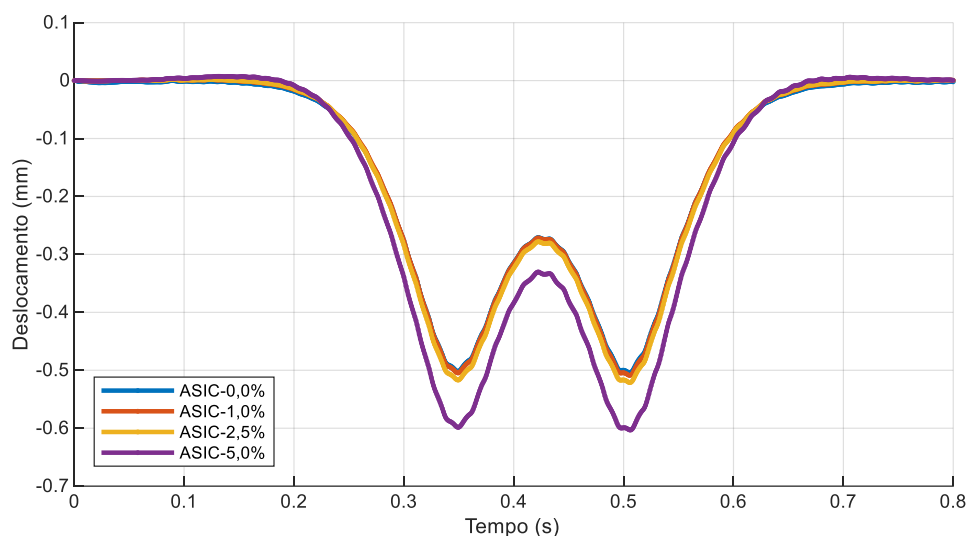


Figura 6.16 Avaliação do acréscimo de borracha em balastro de ASIC nos deslocamentos ao longo do tempo, no carril

6.4.3. Avaliação da influência da adição de borracha nos estados de tensão dos materiais da camada de balastro

Assim como nos estudos descritos anteriormente, o primeiro estudo das tensões é efetuado no instante em que o deslocamento é máximo na travessa central dos modelos.

Esta primeira análise é realizada no plano xy , das tensões σ_z , nas profundidades de $z=0,3$ m e de $z=0,0$ m, que representam respetivamente, à superfície da camada de balastro e acima da camada de sub-balastro, como observa-se na Figura 6.18.

Neste gráfico, observa-se a redução das tensões σ_z na camada mais a superfície e o pequeno aumento na camada acima da camada de sub-balastro, com o aumento das percentagens das partículas de borracha.

Como o aumento das tensões nos elementos de balastro logo acima da camada de sub-balastro, é residual, optou-se por dar continuidade aos estudos da mistura de ASIC com partículas de borracha apenas com elementos à superfície da camada de balastro.

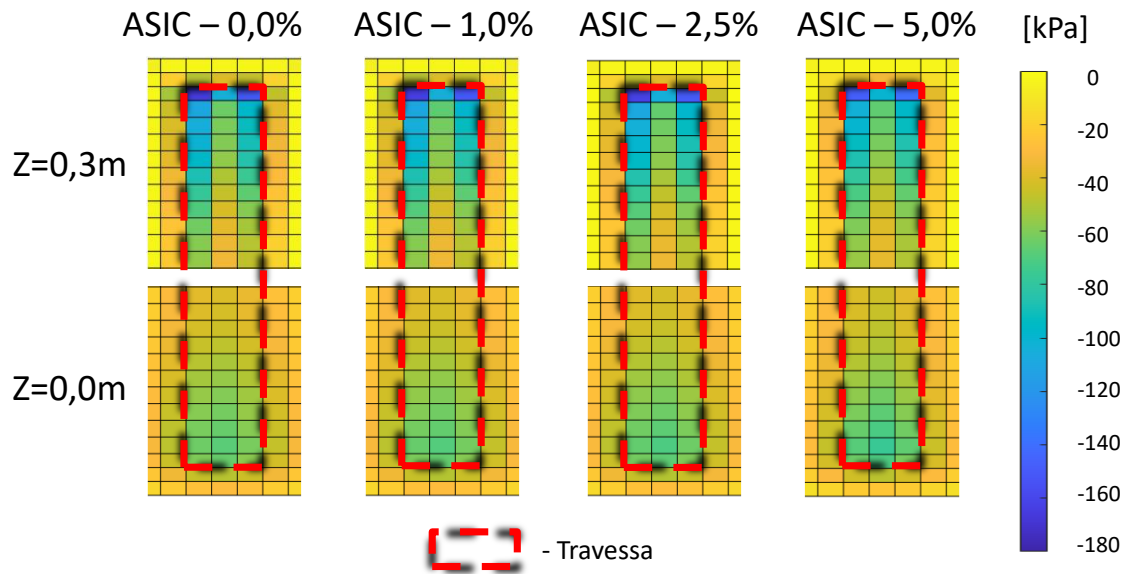


Figura 6.17 Avaliação da influência do acréscimo de borracha em balastro de ASIC nas tensões σ_z ; corte no plano xy

A avaliação das tensões normais (σ) e de corte (τ) com o acréscimo de partículas de borracha na camada de balastro, para o elemento A, está representada na Figura 6.18 até a Figura 6.21.

Nestes gráficos é possível observar a redução do estado de tensão normal e de corte, em todas as direções com adição de partículas de borracha ao ASIC.

No caso de 5% de borracha, as tensões normais σ_z reduzem apenas em aproximadamente 5%, enquanto nas outras direções, σ_x e σ_y , a redução é superior, cerca de 25%. No caso das tensões de corte (τ) ocorre a redução praticamente completa das tensões τ_{xy} e τ_{xz} , enquanto praticamente não há redução da tensão τ_{yz} .

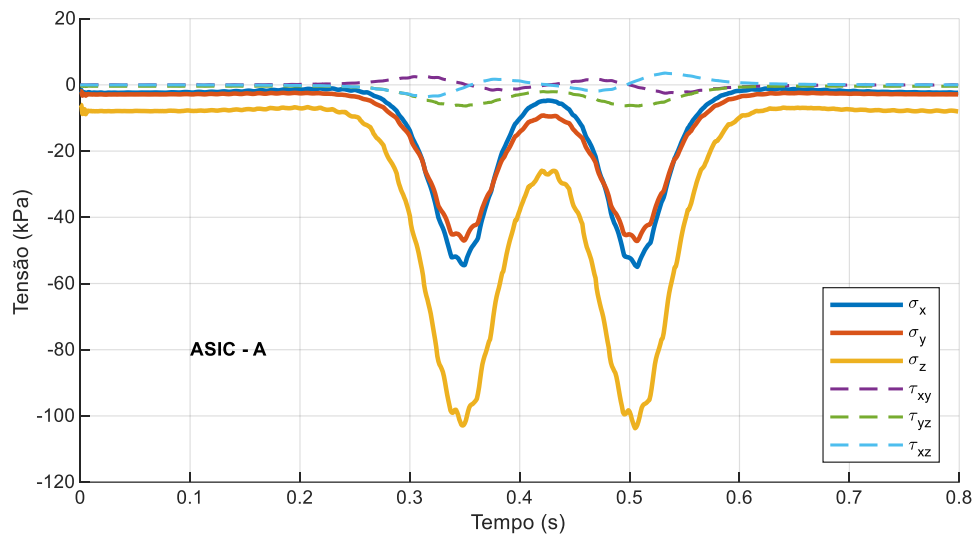


Figura 6.18 Tensões normais e de corte, ao longo do tempo no elemento A - balastro de ASIC sem borracha

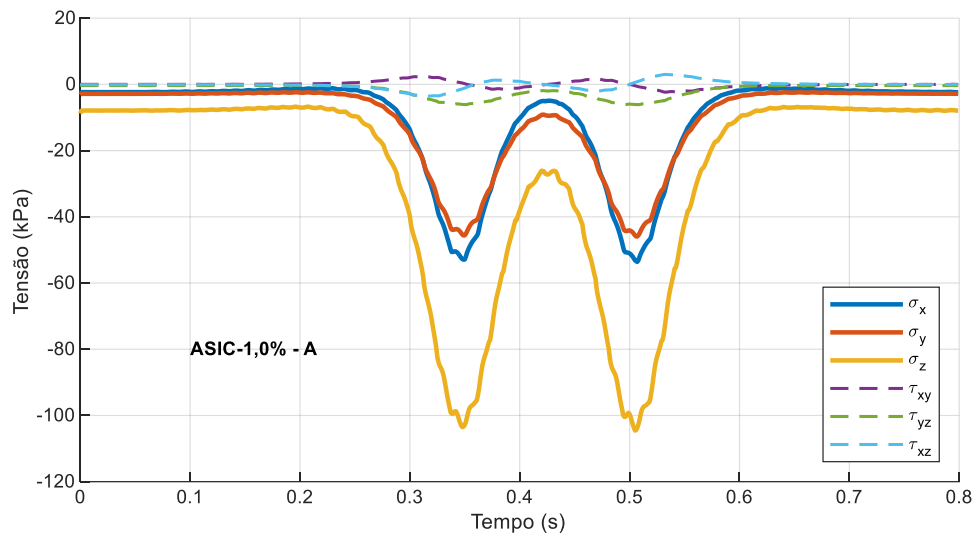


Figura 6.19 Tensões normais e de corte, ao longo do tempo no elemento A - balastro de ASIC com 1,0% de borracha

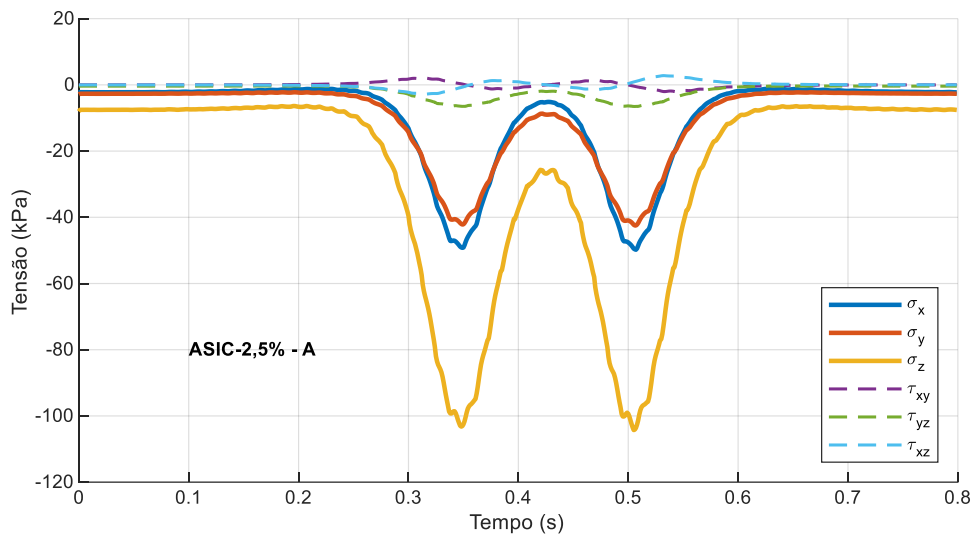


Figura 6.20 Tensões normais e de corte, ao longo do tempo no elemento A - balastro de ASIC com 2,5% de borracha

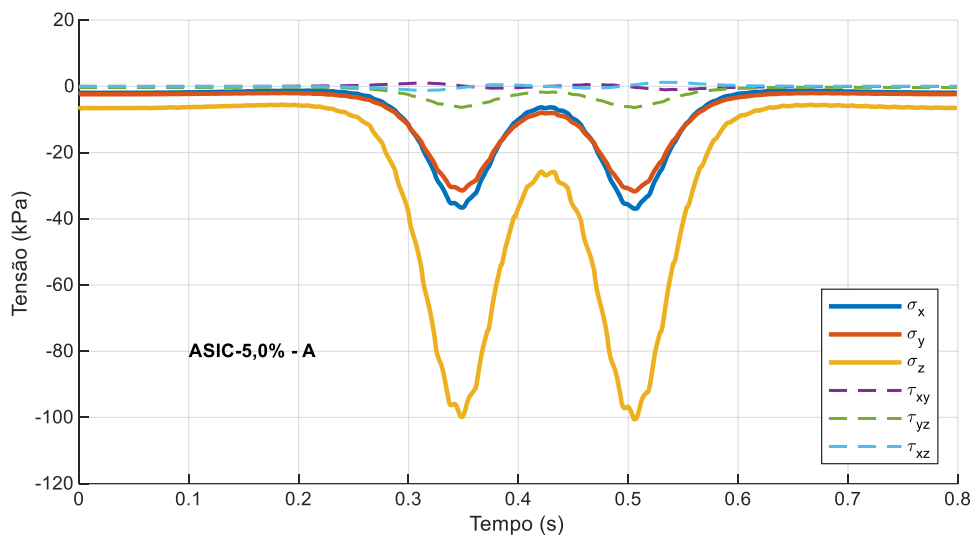


Figura 6.21 Tensões normais e de corte, ao longo do tempo no elemento A - balastro de ASIC com 5,0% de borracha

Para a análise das tensões médias (p) e deviatóricas (q), optou-se por apresentar os resultados dos elementos que compõe, apenas a superfície, da camada de balastro, como referido anteriormente, como se observa na Figura 6.22 até Figura 6.24.

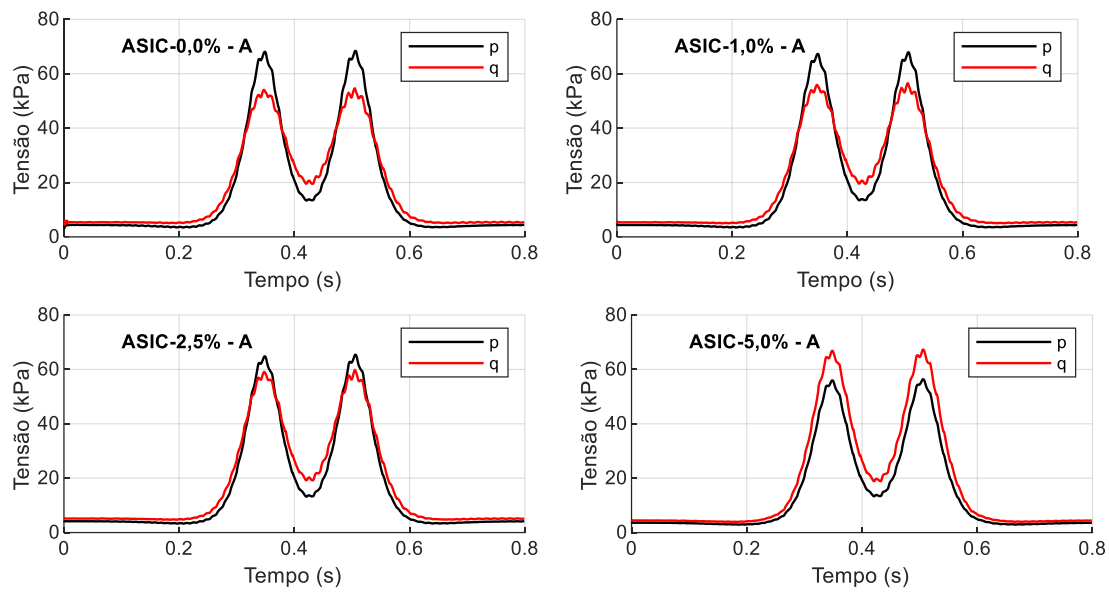


Figura 6.22 Avaliação da influência da adição de borracha na camada de balastro com ASIC, em tensões médias e deviatóricas ao longo do tempo, no elemento A

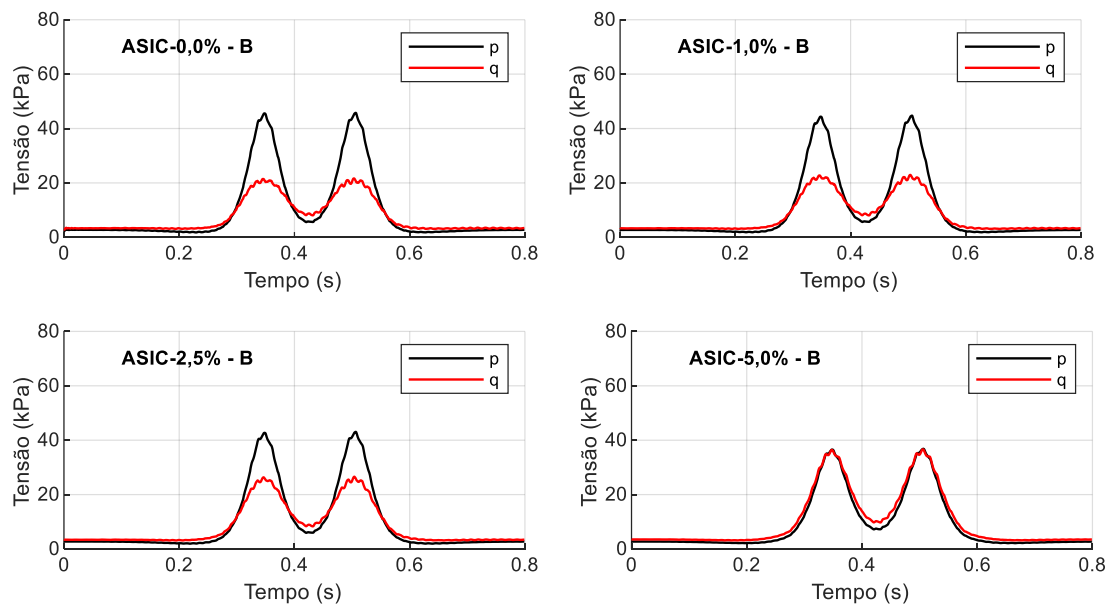


Figura 6.23 Avaliação da influência da adição de borracha na camada de balastro com ASIC, em tensões médias e deviatóricas ao longo do tempo, no elemento B

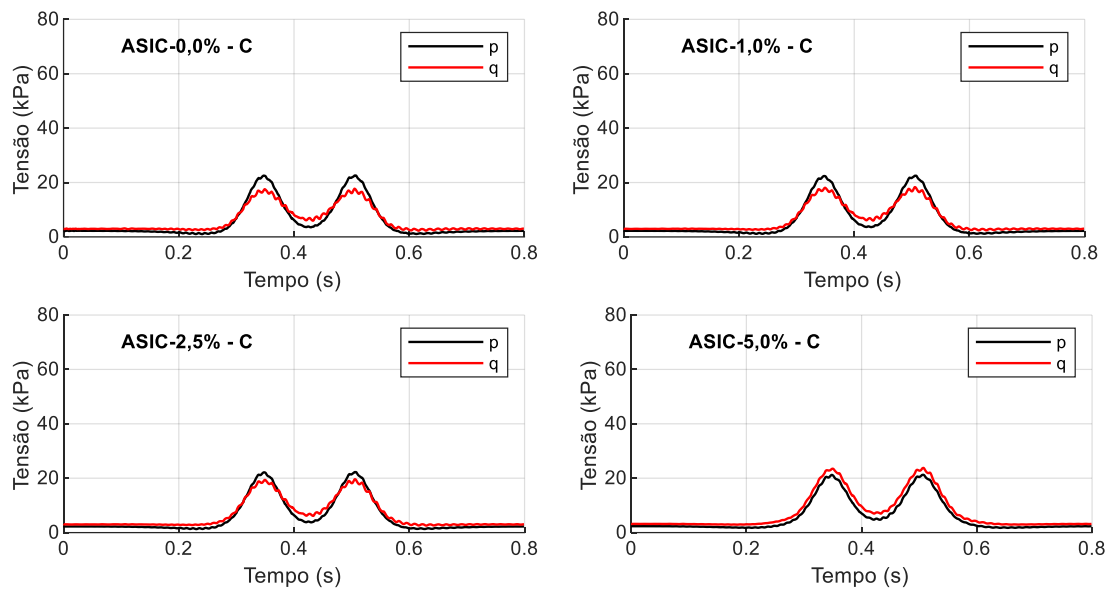


Figura 6.24 Avaliação da influência da adição de borracha na camada de balastro com ASIC, em tensões médias e deviatóricas ao longo do tempo, no elemento C

Para os três elementos, o aumento de partículas de borracha, resulta no aumento da tensão deviatórica e na diminuição da tensão média, podendo ser crítico em relação aos esforços de corte.

Na Figura 6.22, observamos que a adição de 5% de borracha no ASIC, gera o aumento de 30% das tensões q , enquanto reduz em 15% as tensões p . Ao observarmos a Figura 6.23, no elemento B, o mesmo acréscimo de partículas de borracha, aumenta as tensões deviatóricas em 75% e reduz as tensões médias em 20%. No gráfico da Figura 6.24, a adição de 5% de borracha da escória de aciaria, no elemento C, gera o aumento de q em aproximadamente 10% a diminuição de p em apenas 5%.

Para evidenciar o impacto das partículas de borracha nestas tensões, são apresentados os gráficos de tensão q por tensão p , na Figura 6.25.

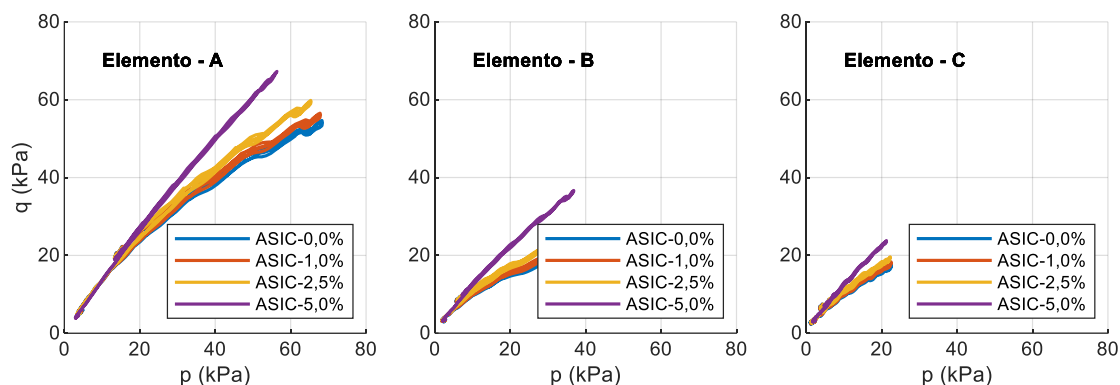


Figura 6.25 Avaliação da influência da adição de borracha nas trajetórias de tensão da camada de balastro com ASIC no espaço (p, q)

O gráfico acima, evidencia o aumento das tensões deviatóricas e o aumento das tensões médias, com o aumento de partículas de borrachas na camada de balastro com a utilização de ASIC, reforçando, que este aumento pode ser crítico em relação aos esforços de corte, nestes elementos.

É possível concluir que as tensões podem ser moldadas em função da estrutura, apenas com o acréscimo de partículas de borracha ao ASIC, chegando a valores de tensões usuais para a camada de balastro.

7. Conclusões e estudos futuros

7.1. Conclusões

O programa *Pegasus* apresentou boa adaptação, com grande flexibilidade nos estudos preliminares, gerando boa familiarização do usuário com o programa selecionado.

O modelo numérico foi bem ajustado aos resultados registrados *in-situ*, selecionados para sua calibração.

Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade estrutural da inclusão de misturas de ASIC-borracha na camada de balastro, tendo evidenciado valores compatíveis com as soluções estruturais usuais, em termos de deslocamentos e do estado de tensão induzido pela passagem de composições ferroviárias.

Em comparação com as soluções de via-férrea balastrada tradicional, a utilização de diferentes percentagens de borracha, nas misturas, possibilita uma certa adaptação estrutural destas soluções, em função das condicionantes ou das especificidades de cada situação.

A má gestão dos recursos das infraestruturas ferroviárias, podem gerar grandes malefícios para o futuro da humanidade. O grande diferencial, a nível ecológico, dos materiais alternativos em relação aos tradicionais é de grande relevância para o desenvolvimento sustentável da economia mundial.

7.2. Estudos futuros

Com os avanços das tecnologias na área da informática, no século XXI, o poder computacional dos computadores tenderá a evoluir. Tendo em vista estes fatores, o desenvolvimento de modelos para avaliar as vibrações na via férrea, com efeitos dinâmicos complexos, pode ser um grande investimento nos próximos anos, evitando problemas estruturais observados, nas vias férreas.

Ensaio *in-situ*, assim como laboratoriais, para avaliarem o comportamento combinando o ASIC com partículas de borracha, deveriam ser executados para comprovarem os resultados obtidos, a partir dos modelos numéricos estudados, no presente documento.

Referências bibliográficas

- ADtranz. 2000. “Relatório Final Tarefa 19 . F Selecção e Modelação de Veículos Em Utilização Pelos Operadores.”
- Ahrens, James, Berk Geveci, and Charles Law. 2005. “ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization, Visualization Handbook, Elsevier.” ISBN-13: 978-0123875822.
- Allaart, A.P. 1992. “Design Principles for FLEXible Pavements.” PhD thesis, TU Delft.
- Brown, S.F., and P.S. Pell. 1967. “An Experimental Investigation of the Stresses, Strains and Deflections in Layered Pavement Structure Subjected to Dynamic Loads.” *In Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements*, no. Ann Arbor: 487–504.
- Correia, Bruno Miguel Machado. 2015. “Resposta Dinâmica Do Sistema Veículo-via Férrea Em Zonas de Variação Das Condições de Suporte Da Via.” Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa.
- Costa, P. Alves, R. Calçada, A. Silva Cardoso, and A. Bodare. 2010. “Influence of Soil Non-Linearity on the Dynamic Response of High-Speed Railway Tracks.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. ISSN 0267-7261: 30(4):221–235. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.11.002>.
- Delgado, Bruno Guimarães. 2019. “Geomecânica de Um Agregado Siderúrgico Inerte Como Material Alternativo Para Lastro de Vias Férreas Do Tipo Heavy Haul.” Tese de Doutorado, FEUP.
- Esveld, Coenraad. 2001. *Modern Railway Track. The Netherlands, 2nd Ed. Edition*.
- Ferreira, Sandra. 2010. “Comportamento Mecânico e Ambiental de Materiais Granulares. Aplicação Às Escórias de Aciaria Nacionais.” Tese de Doutorado, Universidade do Minho.
- Fortunato, Eduardo Manuel Cabrita. 2005. “Renovação de Plataformas Ferroviárias: Estudos Relativos à Capacidade de Carga.” Tese de Doutorado, FEUP.
- Galvín, P., A. Romero, and J Domínguez. 2010. “Fully Three-Dimensional Analysis of High-Speed Traintracksoil-Structure Dynamic Interaction.” *Journal of Sound and Vibration*, no. ISSN 0022-460X: 329(24): 5147 – 5163. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.06.016>.

- Hall, Lars. 2003. "Simulations and Analyses of Train-Induced Ground Vibrations in Finite Element Models." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. ISSN 0267-7261: 23(5):403 – 413. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00209-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00209-9).
- Hicks, R.G. 1970. "Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials." PHD Thesis.
- Hicks, R.G., and C.L. Monismith. 1972. "Prediction of the Resilient Response of Pavements Containing Granular Layers Using Non-Linear Elastic Theory." *In Proc. 3rd Int. Conf. on Asphalt Pavements*, 410–429.
- Lysmer, J., and R.L. Kuhlemeyer. 1969. "Finite Dynamic Model for Infinite Media." *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(EM4):859–877.
- MathWorks Inc. 2014. "Release R2014b Documentation for MATLAB."
- Nielsen, J. C. O., and J. Oscarsson. 2004. "Simulation of Dynamic Train-Track Interaction with State-Dependent Track Properties." *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5):515–532. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.06.033>.
- Paixão, André. 2010. "Critérios de Dimensionamento de Camadas de Apoio Para Vias - Férreas Balastradas." Porto.
- Paixão, André, José N. Varandas, Eduardo Fortunato, and Rui Calçada. 2016. "Non-Linear Behaviour of Geomaterials in Railway Tracks under Different Loading Conditions." *Procedia Engineering* 143 (Ictg): 1128–35. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.147>.
- Rodrigues, André Filipe da Silva. 2017. "Viability and Applicability of Simplified Models for the Dynamic Analysis of Ballasted Railway Tracks." Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa.
- Sheng, X., C.J.C. Jones, and D.J. Thompson. 2006. "Prediction of Ground Vibration from Trains Using the Wavenumber Finite and Boundary Element Methods." *Journal of Sound and Vibration*, no. ISSN 0022-460X: 293(3-5):575 – 586. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.040>.
- Signes, Carlos Hidalgo, Pablo Martínez Fernández, Elías Medel Perallón, and Ricardo Insa Franco. 2015. "Characterisation of an Unbound Granular Mixture with Waste Tyre Rubber for Subballast Layers." *Characterisation of an Unbound Granular Mixture with Waste Tyre Rubber for Subballast Layers* 48 (12): 3847–61. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0443-z>.
- Timoshenko. 1915. "S. Stresses in Rails." *Transactions of the Institute of Ways of Communications*.
- Trainlogistic. 2020. "Série 2300 - Ficha Técnica." 2020. http://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/Gabinete/fich_atm2300.htm.

- Varandas, J. N. 2013. "Long-Term Behaviour of Railway Transitions Under Dynamic Loading." Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa.
- Varandas, J. N., A. Paixão, and E. Fortunato. 2017. "A Study on the Dynamic Train-Track Interaction over Cut-Fill Transitions on Buried Culverts." *Computers and Structures* 189: 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.04.017>.
- Varandas, J., A. Paixão, E. Fortunato, B. Coelho, and P. Hölscher. 2020. "Long-Term Deformation of Railway Tracks Considering Train-Track Interaction and Non-Linear Resilient Behaviour of Aggregates – a 3D FEM Implementation." *Computers and Geotechnics (No Prelo)*.
- Varandas, José N., André Paixão, Eduardo Fortunato, and Paul Hölscher. 2016. "A Numerical Study on the Stress Changes in the Ballast Due to Train Passages." *Procedia Engineering* 143 (Ictg): 1169–76. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.127>.
- Varandas, José Nuno, Manuel A. J. Gonçalves da Silva, and Rúben Silva. 2013. "Ground Vibration Induced by Railway Traffic in Areas with Corrugated Rail." *12th International Conference and Exhibition on Railway Engineering*.
- Zhai, W.M. 1996. "Two Simple Fast Integration Methods for Large-Scale Dynamic Problems in Engineering." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, no. ISSN 1097-0207: 39(24):4199–4214.
- Zhai, W.M, and Z. Cai. 1997. "Dynamic Interaction between a Lumped Mass Vehicle and a Discretely Supported Continuous Rail Track." *Computers & Structures*, 63(5):987–997. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(96\)00401-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(96)00401-4).